

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Vanja Matković

Zagreb, 2010

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada:

dr.sc. Damir Godec

Vanja Matković

Zagreb, 2010

ZAHVALA

Ovaj rad izrađen je pod stručnim vodstvom dr.sc. Damira Godeca, kojem posebno zahvaljujem na pruženoj pomoći i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada, na stručnosti, uloženom trudu posebno u fazi izrade konstrukcije kalupa.

Također se posebno zahvaljujem, kako roditeljima, tako i sestri, na strpljenju i razumijevanju tijekom studiranja.

SAŽETAK

U okviru ovog rada definirane su posebnosti tankostjenog injekcijskog prešanja u usporedbi s klasičnim postupkom injekcijskog prešanja plastomera. Opisan je metodički pristup konstruiranju kalupa, te su razrađeni svi potrebni koraci za reološki, toplinski i mehanički proračun kalupa.

Metodički pristup konstruiranju kalupa primijenjen je na konkretnom primjeru – poklopcu kutije za sladoled. Pri modeliranju otpreska i kalupa korišten je programski paket *CATIA* za 3D modeliranje, dok je za simulaciju punjenja kalupne šupljine korišten programski paket *Moldflow Mold Advisor*.

Važno je napomenuti da su pri konstrukciji kalupa korišteni standardni elementi tvrtke *HASCO*, te je, između ostalog, na temelju kataloga navedene tvrtke određena nepotpuna cijena koštanja kalupa. Uz to, određena je i nepotpuna cijena koštanja otpreska.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. INJEKCIJSKO PREŠANJE POLIMERA	2
2.1. Općenito o postupku	2
2.2. Ciklički tijek procesa injekcijskog prešanja	4
3. OSNOVNI DIJELOVI SUSTAVA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE	5
3.1. Ubrizgavalica	5
3.2. Kalup za injekcijsko prešanje polimera	7
3.2.1. Kalupna šupljina	8
3.2.2. Kućište kalupa	9
3.2.3. Uljevni sustav	10
3.2.3.1. Hladni uljevni sustav	11
3.2.3.2. Vrući uljevni sustav	11
3.2.4. Sustav za temperiranje kalupa	13
3.2.4.1. Podtlačno temperiranje kalupa	13
3.2.4.2. Predtlačno temperiranje kalupa	14
3.2.5. Sustav za vađenje otpreska iz kalupne šupljine	15
3.2.6. Sustav za vođenje i centriranje elemenata kalupa	16
3.2.7. Sustav za odzračivanje kalupa	16
4. POSEBNOSTI TANKOSTJENOG INJEKCIJSKOG PREŠANJA	17
4.1. Opis postupka	17
4.2. Izbor materijala	18
4.3. Uvjeti preradbe	18
4.4. Ubrizgavalica za tankostjeno injekcijsko prešanje	19
4.5. Kalup za tankostjeno injekcijsko prešanje	21
5. METODIČKO KONSTRUIRANJE KALUPA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE	22
5.1. Aktivnosti tijekom konstruiranja kalupa za injekcijsko prešanje	22
5.2. Funkcija kalupa za injekcijsko prešanje plastomera	23
5.3. Konceptijsko oblikovanje kalupa	26
5.3.1. Načelno određivanje tipa kućišta kalupa	28

5.3.2. Načelno određivanje rasporeda kalupnih šupljina	28
5.3.3. Načelno određivanje uljevnog sustava i ušća	28
5.3.4. Načelno određivanje sustava za temperiranje	28
5.3.5. Načelno određivanje sustava za vađenje otpreska iz kalupa	28
5.3.6. Načelno određivanje sustava za vođenje i centriranje	29
5.3.7. Načelno određivanje sustava za odzračivanje kalupne šupljine	29
5.4. Dimenzioniranje elemenata kalupa.....	37
5.4.1. Reološki proračun kalupa	37
5.4.1.1. Određivanje potrebnog tlaka u kalupnoj šupljini.....	37
5.4.1.2. Dimenzioniranje uljevnog sustava	38
5.4.1.3. Proračun pada pritiska u uljevnom sustavu.....	38
5.4.1.4. Proračun pada pritiska u mlaznici ubrizgavalice.....	42
5.4.1.5. Proračun sile držanja kalupa.....	43
5.4.2. Toplinski proračun kalupa	44
5.4.2.1. Analiza ciklusa injekcijskog prešanja	44
5.4.2.2. Opća jednadžba hlađenja plastomernih otpresaka	44
5.4.2.3. Pomoćno vrijeme ciklusa.....	46
5.4.2.4. Proračun temperature podešavanja kalupne šupljine	48
5.4.2.5. Temperatura i toplinska svojstva medija za temperiranje.....	48
5.4.2.6. Proračun toplinske bilance kalupa	49
5.4.2.7. Toplina izmijenjena zračenjem kroz stijenke kalupa	49
5.4.2.8. Konvektivna izmjena topline	49
5.4.2.9. Toplina dovedena plastomernom taljevinom	50
5.4.2.10. Toplina izmijenjena s medijem za temperiranje.....	50
5.4.2.10.1. Promjer kanala za temperiranje	50
5.4.2.11. Debljina stijenke kalupne šupljine	51
5.4.3. Mehanički proračun kalupa.....	53
5.4.3.1. Proračun kinematike kalupa.....	53
5.4.3.2. Dimenzioniranje sustava za vođenje i centriranje.....	54
5.4.3.3. Proračun sile vađenja otpreska iz kalupa i elemenata sustava za vođenje	55
5.4.3.4. Dimenzioniranje sustava za odzračivanje	55
5.4.3.5. Proračun krutosti kalupa okomito na smjer otvaranja.....	55
5.4.3.6. Proračun krutosti kalupa u smjeru otvaranja kalupa	56

5.4.3.7. Proračun sile otvaranja i površinskog pritiska na sljubnicu	57
6. KONSTRUIRANJE KALUPA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE OTPRESKA.....	58
6.1. Izbor materijala otpreska	58
6.2. Provjera tehničnosti otpreska s pomoću računala.....	59
6.3. Reološki proračun kalupa	64
6.4. Toplinski proračun kalupa	66
6.4.1. Proračun vremena i temperatura	66
6.4.1.1. Efektivna toplinska difuzivnost.....	66
6.4.1.2. Proračun pomoćnog vremena	66
6.4.1.3. Proračun ciklusa injekcijskog prešanja	67
6.4.1.4. Proračun temperatura	68
6.4.1.5. Temperatura i toplinska svojstva medija za temperiranje.....	69
6.4.2. Toplinska bilanca	69
6.4.2.1. Proračun izmjene topline s okolinom.....	69
6.4.2.2. Toplina koju dovodi plastomer.....	71
6.4.2.3. Toplina izmijenjena s medijem za temperiranje.....	72
6.4.3. Izmjere i parametri sustava za temperiranje.....	72
6.4.3.1. Izmjere kanala za temperiranje	72
6.4.3.2. Optimiranje debljine stijenke kalupne šupljine	72
6.4.3.3. Toplinska prohodnost	74
6.4.3.4. Proračun pumpe	74
6.5. Mehanički proračun kalupa.....	76
6.5.1. Proračun kinematike kalupa.....	76
6.5.2. Dimenzioniranje elemenata kalupa.....	76
6.6. Proračun nepotpune cijene koštanja otpreska.....	79
6.6.1. Osnovni podaci.....	79
6.6.2. Troškovi konstruiranja.....	81
6.6.3. Troškovi izradbe kalupa.....	81
6.6.4. Troškovi prototipne serije.....	82
6.6.5. Troškovi održavanja za jedan otpresak	82
6.6.6. Troškovi probne (nulte) serije	82
6.6.7. Troškovi proizvodnje	83
6.6.8. Prosječna cijena otpreska probne (nulte) i proizvodne serije.....	84

6.6.9. Konačna, nepotpuna cijena koštanja po otpresku	84
7. ZAKLJUČAK	85
8. LITERATURA	86
9. PRILOG	87

POPIS SLIKA

Slika 2.1: Model sustava za injekcijsko prešanje

Slika 3.1: Sustav za injekcijsko prešanje

Slika 3.2: Sustav za ubrizgavanje

Slika 3.3: Kalup za injekcijsko prešanje sa osnovnim dijelovima

Slika 3.4: Grozd

Slika 4.1: Razlika između tankostjenog i konvencionalnog injekcijskog prešanja

Slika 5.1: Temeljne faze konstruiranja kalupa za injekcijsko prešanje plastomera

Slika 5.2: Parcijalne funkcije kalupa za injekcijsko prešanje

Slika 5.3: Razrada faze koncipiranja kalupa za injekcijsko prešanje

Slika 5.4: Dijagram načelnog određivanja tipa kućišta kalupa

Slika 5.5: Dijagram za načelno određivanje položaja otpreska u kalupu

Slika 5.6: Dijagram za načelno određivanje uljevnog sustava i ušća

Slika 5.7: Dijagram za načelno određivanje sustava za temperiranje

Slika 5.8: Dijagram za načelno određivanje sustava za vađenje grozda iz kalupa

Slika 5.9: Dijagram za načelno određivanje sustava za vođenje i centriranje

Slika 5.10: Dijagram za načelno određivanje sustava za odzračivanje kalupa

Slika 5.11: Glavne aktivnosti središnje faze konstruiranja

Slika 5.12: Uravnoteženje poprečnih sila: a) neuravnoteženi kalup, b) uravnoteženi kalup

Slika 6.1: Vrijeme popunjavanja kalupne šupljine

Slika 6.2: Tlak ubrizgavanja

Slika 6.3: Temperatura čela taljevine

Slika 6.4: Uključine zraka

Slika 6.5: Razdioba površinskih temperatura

Slika 6.6: Razdioba vremena hlađenja

Slika 6.7: Analiza vjerojatnosti ispunjavanja kalupne šupljine

Slika 6.8: Analiza predviđene kakvoće površine otpreska

Slika 6.9: Dijagram $p - v - T$ za PP Borpact SG930MO

Slika 6.10: Vruća mlaznica HASCO Z101G/32x61

POPIS TABLICA

Tablica 3.1: Gospodarske i tehničke prednosti i nedostaci vrućih uljevnih sustava

Tablica 4.1: Omjer debljine i duljine toka taljevine tankostjenog injekcijskog prešanja

Tablica 5.1: Parcijalne funkcije kalupa za injekcijsko prešanje i odgovarajući elementi

Tablica 5.2: Međusobni utjecaji parcijalnih funkcija kalupa

Tablica 5.3: Koeficijenti jednadžbe pravca za $a_{ef}=f(T_k)$

Tablica 5.4: Koeficijenti oblika i unutrašnjosti za otpreske različitih oblika

Tablica 5.5: Vrijednosti koeficijenata za izračunavanje razlike specifičnih entalpija

Tablica 6.1: Neka svojstva polipropilena

Tablica 6.2: Najvažnije veličine ubrizgavalice SUMITOMO SE750DUZ

Tablica 6.3: Standardni elementi kalupa tvrtke HASCO

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

Oznaka	Veličina	Jedinica
A	- bezdimenzijska značajka	-
A_1	- površina kalupa koja izmjenjuje toplinu s okolinom	m^2
A_2	- površina kanala koja izmjenjuje toplinu s okolinom	m^2
A_{KS}	- tlocrtna površina kalupnih površina	m^2
A_{KT}	- površina kanala za temperiranje	m^2
a_1	- koeficijent	$m^2s^{-1}K^{-1}$
a_2	- koeficijent za izračunavanje razlike entalpija	-
a_3	- koeficijent za izračunavanje razlike entalpija	-
a_{ef}	- efektivna toplinska difuzivnost	m^2/s
a_{Mm}	- toplinska difuznost medija za temperiranje	m^2/s
B_K	- širina kalupa	m
b	- razmak između odstoynih letvi	m
b_1	- koeficijent	$m^2s^{-1}K^{-1}$
b_2	- koeficijent za izračunavanje razlike entalpija	-
b_3	- koeficijent za izračunavanje razlike entalpija	-
b_K	- toplinska prodornost materijala elemenata kalupa	$Ws^{1/2}m^{-2}K^{-1}$
b_P	- toplinska prodornost plastomerne taljevine	$Ws^{1/2}m^{-2}K^{-1}$
b_O	- karakteristična izmjera otpreska	m
b_u	- širina lepezastog ušća	m
C_{0PS}	- proizvodna cijena jednog otpreska	Kn
C_{0serO}	- troškovi održavanja za jedan otpresak	Kn
C_{com}	- jedinična cijena osnovnog materijala	Kn/kg
C_{izi}	- prosječna cijena ranog sata obrade	Kn
C_{KONO}	- troškovi konstruiranja po jednom otpresku	Kn
C_{kPS}	- režijski troškovi kontrole ulaza	Kn
C_{mKS}	- ukupni trošak materijala za jednu prototipnu seriju	Kn
C_{mO}	- cijena materijala za jedan otpresak	Kn
C_{mPS}	- cijena materijala za probnu seriju	Kn
C_o	- konačna, nepotpuna cijena koštanja po otpresku	Kn
C_{osKS}	- predviđeni troškovi dorade	Kn

C_{PRO}	- prosječna cijena otpreska probne (nulte) i proizvodne serije	Kn
C_{rki}	- cijena radnog sata za pojedinu fazu konstruiranja	Kn
C_{rKS}	- ukupan trošak radne snage za jednu prototipnu seriju	Kn
C_{rPS}	- cijena proizvoda za probnu seriju	Kn
C_{rs}	- cijena radnog sata radnika	Kn/h
C_{ru}	- cijena radnog sata ubrizgavalice	Kn/h
C_{sdi}	- cijena pojedinog standardnog elementa	Kn
C_{sKS}	- ukupni trošak ubrizgavalice za jednu prototipnu seriju	Kn
C_{sPS}	- cijena ubrizgavalice	Kn
C_{mPS}	- trošak ubrizgavalice za probnu seriju	Kn
C_{sO}	- cijena ubrizgavalice za jedan otpresak	Kn
C_Z	- zračivost apsolutno crnog tijela	W/m ² K
c_K	- specifični toplinski kapacitet materijala kalupnih ploča	J/kgK
c_M	- specifični toplinski kapacitet medija za temperiranje	J/kgK
c_p	- specifični toplinski kapacitet polimera	J/kgK
c_{ki}	- zračnost između kosog izvlačiva i kliznika ili školjke	m
c_w	- specifični toplinski kapacitet vode	J/kgK
d_K	- promjer kanala za temperiranje	m
d_{pv}	- promjer pužnog vijka	m
E_r	- modul rastezljivosti	N/m ²
E_s	- modul savitljivosti	N/m ²
e	- duljina ravnog dijela provrta u klizniku ili školjki	m
F	- sila na temeljnu ploču	N
F_1	- sila u smjeru gibanja kliznika	N
F_2	- sila okomita na	N
F_O	- sila otvaranja kalupa	N
F_d	- sila držanja kalupa	N
F_{ov}	- sila odvijanja (u smjeru otvaranja kalupa)	N
F_t	- sila trenja po obodu jezgre	N
F_u	- sila ubrizgavanja	N
F_Z	- sila zatvaranja kalupa	N
f_2	- progib stranice kalupne ploče	m
f_{dj}	- progib duge jezgre	m
f_{ki}	- progib izvlačila	m

f_{\max}	- maksimalni progib stijenke kalupne šupljine	m
f	- dopušteni progib temeljne ploče	m
G	- modul smičnosti materijala stijenke kalupne šupljine	N/m ²
G_{OR}	- organizacijski gubici prototipne serije	h
H_K	- visina kalupa	m
$H_{U\max}$	- maksimalni razmak steznih ploča ubrizgavalice	m
h	- entalpija	J/kg
h_1	- specifična entalpija pri prosječnoj temperaturi otpreska u trenutku njegova napuštanja kalupa	J/kg
h_2	- specifična entalpija pri temperaturi i tlaku preradbe	J/kg
h_{OK}	- potrebno otvaranje kalupa	m
$h_{U\min}$	- minimalni potrebni razmak steznih ploča ubrizgavalice	m
h_d	- dodatno otvaranje kalupa	m
h_{di}	- dopunski (sigurnosni) hod izbacivala	m
h_g	- visina grozda	m
h_i	- duljina puta izbacivala	m
h_o	- visina otpreska	m
h_{op}	- visina otpreska u pomičnom dijelu kalupa	m
h_{kp}	- debljina (visina) temeljne ploče	m
h_u	- visina uljevka	m
K_O	- koeficijent oblika otpreska	-
K_{OT}	- konstanta plastomernog materijala	kg/ms ^{1-m}
K_U	- koeficijent unutrašnjosti otpreska	-
L_K	- duljina kalupa	m
l	- duljina temeljne ploče	m
l_k	- duljina kanala za temperiranje	m
M_{ki}	- pomak kliznika ili poluškoljke	m
m	- eksponent tečenja plastomerne taljevine	-
m_K	- masa kalupa	kg
m_g	- masa grozda	kg
m_o	- masa otpreska	kg
m_{us}	- masa uljevnog sustava	kg
m_{so}	- masa svih otpresaka u jednom ciklusu injekcijskog prešanja	kg
n_K	- broj kalupnih šupljina	-

n_{KS}	- planirani broj prototipnih serija	-
n_{KT}	- broj kanala za temperiranje	-
n_i	- broj komponenata mješavine medija za temperiranje	-
n_{izi}	- broj sati pojedine operacije obrade	h
n_{nj}	- broj navojnih jezgri	-
n_p	- broj dvostrukih promjera smjera toka medija za temperiranje	-
n_r	- broj radnika	-
n_{rki}	- broj radnih sati za pojedinu fazu konstruiranja	h
n_{sdi}	- količina pojedinog standardnog elementa	kom
n_{ser}	- veličina serije	kom
n_{serKS}	- veličina prototipne serije	kom
n_{serPS}	- veličina probne serije	kom
n_{uk}	- ukupna količina otpreska	kom
P_{Pef}	- efektivno potrebna snaga pumpe	W
P_{VS}	- instalirana snaga uljevnog sustava	W
P_g	- snaga grijanja	W
P_h	- snaga hlađenja	W
Pr	- Prandtlova značajka	-
Pr_w	- Prandtlova značajka vode	-
p_K	- tlak u kalupnoj šupljini	Pa
p_{Kx}	- pritisak u kalupnoj šupljini u smjeru otvaranja kalupa	N/m ²
p_O	- okolišni tlak	Pa
p_R	- predtlak u kalupnoj šupljini	N/m ²
p_T	- tlak plastomerne taljevine	N/m ²
p_j	- tlak koji djeluje na jezgru	N/m ²
p_u	- pritisak ubrizgavanja	N/m ²
q_{VP}	- kapacitet pumpe	m ³ /s
q_P	- učin plastificiranja	g/s
Re	- Reynoldsov broj	-
S_L	- skupljanje	%
S_V	- stezanje	%
S_{io}	- ploština otpres(a)ka koje daje u jednom smjeru	m ²
S_u	- predvidivi dio škarta	%
S_{us}	- ploština uljevnog sustava	m ²

s_K	- debljina stijenke kalupne šupljine	m
T_{0ser}	- troškovi održavanja kalupa za seriju	Kn
T_D	- dodirna temperatura	K
T_{iz}	- ukupna cijena obrade kalupa	Kn
T_K	- temperatura stijenke kalupne šupljine	K
T_{KS}	- troškovi prototipne serije	Kn
T_{KONS}	- ostali troškovi konstruiranja	Kn
T_{KOS}	- ostali troškovi izradbe kalupa	Kn
T_{KT}	- temperatura stijenke kanala za temperiranje	K
T_M	- temperatura medija za temperiranje	K
T_{MI}	- izlazna temperatura medija za temperiranje	K
T_{MU}	- ulazna temperatura medija za temperiranje	K
T_O	- temperatura okoline	K
T_{OK}	- temperatura otvaranja kalupa	K
T_{om}	- ukupna cijena osnovnog materijala nestandardnih elemenata kalupa	Kn
T_P	- početna temperatura	K
T_{PO}	- temperatura postojanosti oblika	K
T_{sd}	- ukupna cijena standardnih elemenata kalupa	Kn
T_T	- temperatura plastomerne taljevine	K
T_{VK}	- temperatura vanjske stijenke kalupa	K
T_g	- staklište	K
t_c	- vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja	s
$t_{\check{c}}$	- vrijeme čišćenja kalupa	s
t_h	- vrijeme hlađenja otpreska	s
t_d	- dodatno vrijeme hlađenja	s
t_{k1}	- vrijeme posluživanja otvorenog kalupa	s
t_{k2}	- vrijeme posluživanja zatvorenog kalupa	s
t_{k3}	- vrijeme posluživanja zatvorenog kalupa u trenutku prije njegova otvaranja	s
t_{k4}	- vrijeme posluživanja kalupa pri vađenju otpreska	s
t_m	- vrijeme čišćenja i podmazivanja kalupa	s
t_{ml}	- vrijeme podmazivanja jedne kalupne šupljine	s
t_{mp}	- vrijeme približavanja mlaznice	s

t_{mr}	- vrijeme vraćanja mlaznice ubrizgavalice u početni položaj	s
t_{np}	- vrijeme djelovanja naknadnog pritiska u kalupnoj šupljini	s
t_o	- vrijeme otvaranja	s
t_{os}	- strojno vrijeme otvaranja kalupa	s
t_p	- pomoćno vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja	s
t_{ps}	- vrijeme plastificiranja	s
t_{pz}	- pripremno završno vrijeme	s
t_s	- vrijeme ukapčanja	s
t_u	- vrijeme ubrizgavanja	s
t_z	- vrijeme zatvaranja kalupa	s
t_{zs}	- strojno vrijeme zatvaranja kalupa	s
V_o	- obujam otpreska	m ³
V_u	- obujam ubrizgavalice	m ³
v	- brzina tečenja plastomerne taljevine	m/s
v_u	- brzina ubrizgavanja	m/s
$x_{kš}$	- broj kalupnih šupljina	-
α_K	- konvektivna toplinska prijelaznost	W/m ² K
α_{St}	- korigirani koeficijent toplinske prijelaznosti	W/m ² K
α_{Sto}	- toplinska prijelaznost uslijed konvekcije i zračenja	W/m ² K
α_{ki}	- kut nagiba kosog izvlačila	°
α_z	- toplinska prijelaznost zračenja	W/m ² K
β_v	- faktor proporcionalnosti	W/m ² K
β_{vk}	- korigirana vrijednost faktora proporcionalnosti	W/m ² K
Δh	- razlika entalpija pri temperaturi taljevine i otpreska	J/kg
Δp_n	- pad pritiska u mlaznici ubrizgavalice	N/m ²
Δp_{us}	- pad pritiska u segmentu uljevnog sustava	N/m ²
ΔT	- razlika u temperaturama između vanjske stijenke kalupa i okoline	K
ΔT_M	- razlika u temperaturama medija za temperiranje na ulazu i izlazu iz kalupa	K
ΔT_{MK}	- temperaturni gradijent između medija za temperiranje i stijenke kalupne šupljine	K
ε	- deformacija stijenke kalupne šupljine	%
ε_z	- sposobnost zračenja kalupnih ploča	-
Φ_A	- toplinski tok u jedinici vremena	W

Φ_K	- toplinski tok izmijenjen konvekcijom	W
Φ_M	- toplina izmijenjena s medijem za temperiranje	W
Φ_O	- toplina izmijenjena s okolinom	W
Φ_P	- toplina koju plastomer preda kalupu	W
Φ_{PD}	- toplinski tok dovođenja topline	W
Φ_{St}	- toplina izmijenjena zračenjem i konvekcijom kroz stranice kalupa	W
Φ_V	- toplina izmijenjena provođenjem kroz nosače kalupa ubrizgavalice	W
Φ_Z	- toplina izmijenjena zračenjem	W
ϕ	- kut ugradnje umetka	°
ϕ_{ki}	- kut nagiba kosog izvlačila	°
γ	- smična brzina plastomerne taljevine	s ⁻¹
η	- smična viskoznost	Pas
η_{VS}	- korisnost vrućeg uljevnog sustava	-
η_p	- korisnost pumpe	-
φ	- koeficijent oblika segmenta uljevnog sustava	-
λ_l	- toplinska provodnost izolacijske ploče	W/mK
λ_K	- toplinska provodnost materijala kalupa	W/mK
λ_p	- toplinska provodnost polimera	W/mK
λ_w	- toplinska provodnost vode	W/mK
μ	- faktor trenja između plastomernog materijala i elemenata šupljine	-
μ_p	- pouzdanost postupka	%
ν	- Poissonov faktor	-
ν_M	- kinematička viskoznost medija za temperiranje	m ² /s
ν_w	- kinematička viskoznost vode	m ² /s
ρ	- kut trenja	°
ρ_K	- gustoća materijala kalupnih ploča	kg/m ³
ρ_M	- gustoća medija za temperiranje	kg/m ³
ρ_T	- gustoća polimerne taljevine	kg/m ³
ρ_w	- gustoća vode	kg/m ³
σ_{dop}	- dopušteno savojno naprezanje kalupnih ploča	N/m ²
τ_{dop}	- dopušteno smično naprezanje kalupnih ploča	N/m ²
ξ_{DK}	- otpor tečenju u kanalu	-

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno, uz korištenje navedene literature i konzultacija.

Vanja Matković

1. UVOD

Injekcijsko prešanje je jedan od najznačajnijih postupaka preradbe polimernih materijala. Konstantni razvoj i usavršavanje postojećih procesa, postupaka i njihovih materijala dovelo je do razvoja tzv. unaprijeđenih postupaka injekcijskog prešanja polimera. Jedan od tih postupaka je i injekcijsko prešanje tankostjenih otpresaka.

Injekcijsko prešanje polimera, pruža veliku slobodu pri konstrukciji tvorevina, te omogućava ekonomičnu proizvodnju izratka. Značajan udio u toj proizvodnji imaju izraci dobiveni postupkom injekcijskog prešanja plastomera, koji je i tema ovog rada.

Otpresci su sve kompliciraniji i kompleksniji, te kvalitetniji, dok se istodobno zahtjeva što kraći rok isporuke, te što niža cijena otpreska. Ovi zahtjevi doveli su do intenzivnog usavršavanja i metodičkog razvoja procesa konstruiranja kalupa. Osnova metodičkog konstruiranja kalupa je raščlanjivanje ukupne funkcije kalupa na parcijalne. Pronalaženjem optimalnog rješenja svake pojedine parcijalne funkcije i poznavanjem međusobnih utjecaja parcijalnih funkcija, dobiva se optimalno rješenje ukupne funkcije kalupa.

Vrlo značajna faza pri konstrukciji kalupa je faza dimenzioniranja elemenata kalupa. Ona se načelno dijeli na reološki, toplinski i mehanički proračun. Također je vrlo važna stavka u planiranju konstrukcije, pa i same proizvodnje određivanje cijene koštanja polimernog otpreska.

Cilj ovog rada je prikaz metodičkog i tehnologijskog pristupa konstruiranju kalupa za tankostjeno injekcijsko prešanje, te usporedba tankostjenog s klasičnim postupkom injekcijskog prešanja.

2. INJEKCIJSKO PREŠANJE POLIMERA

2.1. Općenito o postupku

Injekcijsko prešanje polimera je najvažniji ciklički postupak praoblikovanja ubrizgavanjem tvari potrebne smične viskoznosti u temperiranu kalupnu šupljinu. U počecima razvoja bio je namijenjen izradbi makrogeometrijskih otpresaka preradbom plastomernog granulata (čvrsto stanje), no danas se njime prerađuju sve vrste polimera: duromeri, elastomeri, elastoplastomeri, a posebno je proširena preradba plastomernih taljevina. [1]

Polireakcijom i/ili umrežavanjem, geliranjem i/ili hlađenjem otpresak postaje podoban za vađenje iz kalupne šupljine. Otpresci mogu biti različitih veličina i stupnjeva kompliciranosti, pri čemu se ostvaruje visoka dimenzijska stabilnost. Tim se postupkom u jednom ciklusu od tvari ili materijala pravi tvorevina koja se najčešće može rabiti odmah ili uz malu naknadnu obradu. [2]

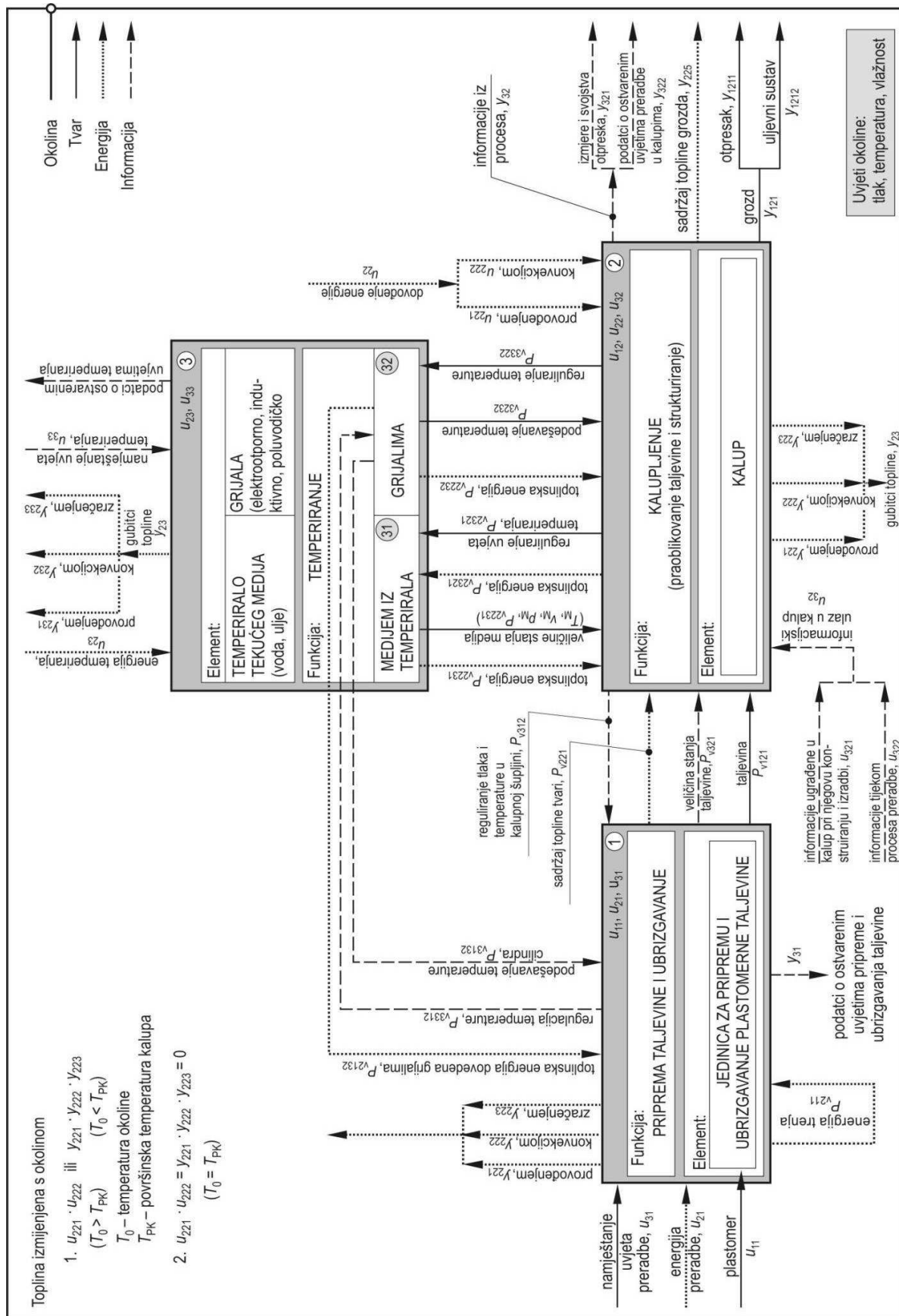
Injekcijsko prešanje je najčešći proizvodni proces za izradbu polimernih dijelova. Široka paleta proizvoda je proizvedena pomoću injekcijskog prešanja, a uvelike se razlikuju po svojoj veličini, složenosti i namjeni.

Iako se većina injekcijskog prešanja odnosi na konvencionalne procese injekcijskog prešanja, postupke injekcijskog prešanja tvari moguće je podijeliti prema različitim kriterijima. Postoje nekoliko važnih varijacija injekcijskog prešanja, uključujući:

- nereakcijsko injekcijsko prešanje
- injekcijsko prešanje s uklonjivim jezgrama
- višekomponentno injekcijsko prešanje
- injekcijsko povezivanje
- injekcijsko ukrašavanje
- visokotlačno i nisko tlačno reakcijsko injekcijsko prešanje
- injekcijsko prešanje šupljikavih otpresaka. [1]

U radu postavljen je zadatak definirati posebnosti postupka injekcijskog prešanja tankostjenih otpresaka, koje pripada nereakcijskom injekcijskom prešanju.

Model sustava za injekcijsko prešanje plastomernih taljevina koji sadržava materijalne, energijske i informacijske ulaze i izlaze, kao i veze među elementima, prikazuje slika 2.1.



2.2. Ciklički tijek procesa injekcijskog prešanja [2]

Osnovna je zadaća postupka injekcijskog prešanja plastomernih taljevina pravljenje zadanog otpreska, što se zbiva tijekom jednog ciklusa.

Plastomeri u čvrstom stanju, u obliku granula, dobavljaju se uvlačnoj zoni pužnog vijka koji ih zahvaća i potiskuje prema naprijed. Toplina potrebna za postizanje potrebne smične viskoznosti plastomerne taljevine dovodi se grijalima, medijem za temperiranje i pretvaranjem mehaničkog rada trenja pužnog vijka u toplinsku energiju uslijed smicanja materijala duž površine pužnog vijka i stijenke cilindra.

Vrtnjom pužnog vijka pri plastificiranju čvrsti se plastomer transportira prema sabirnici. Pritom se kao posljedica javlja sila reakcije na pužni vijak, koja ga nastoji pomaknuti prema natrag. Zbog toga je potrebno u hidrauličkom cilindru ubrizgavalice ostvariti usporni pritisak. Veličina uspornog pritiska podešava se na upravljačkom uređaju ubrizgavalice. Povišenjem uspornog pritiska mora se povisiti i frekvencija vrtnje pužnog vijka, što rezultira povišenjem temperature taljevine i skraćanjem ciklusa.

Prije nego započne ubrizgavanje pripremljene taljevine u zatvoreni kalup, potrebno je primaknuti mlaznicu jedinice za pripremu taljevine i ubrizgavanje tako da nalegne na otvor uljevnog tuljca kalupa. Pužni vijak u toj fazi djeluje kao klip, te aksijalnim pomicanjem prema naprijed ubrizgava taljevinu u kalupnu šupljinu. Tijekom ubrizgavanja pužnom se vijku mora blokiranjem spriječiti vrtnja.

Završetkom ubrizgavanja, kad su sve kalupne šupljine po mogućnosti istodobno popunjene, snižava se pritisak ubrizgavanja na naknadni pritisak. Pritisak ubrizgavanja definira se kao omjer sile ubrizgavanja i ploštine pužnog vijka u smjeru ubrizgavanja. Naknadni pritisak sprječava povratak taljevine iz kalupa. Pri injekcijskom prešanju plastomera naknadni pritisak djeluje do trenutka kad se spojno mjesto između kalupne šupljine i uljevnog sustava toliko hladi i očvrsne da više nije moguć protok taljevine.

Nakon isteka naknadnog pritiska, pužni vijak se ponovno počinje okretati i uvlačiti plastomer u uvlačnu zonu cilindra za teljenje pripremajući taljevinu za slijedeći ciklus. Naredna je operacija vraćanje jedinice za ubrizgavanje u početni položaj.

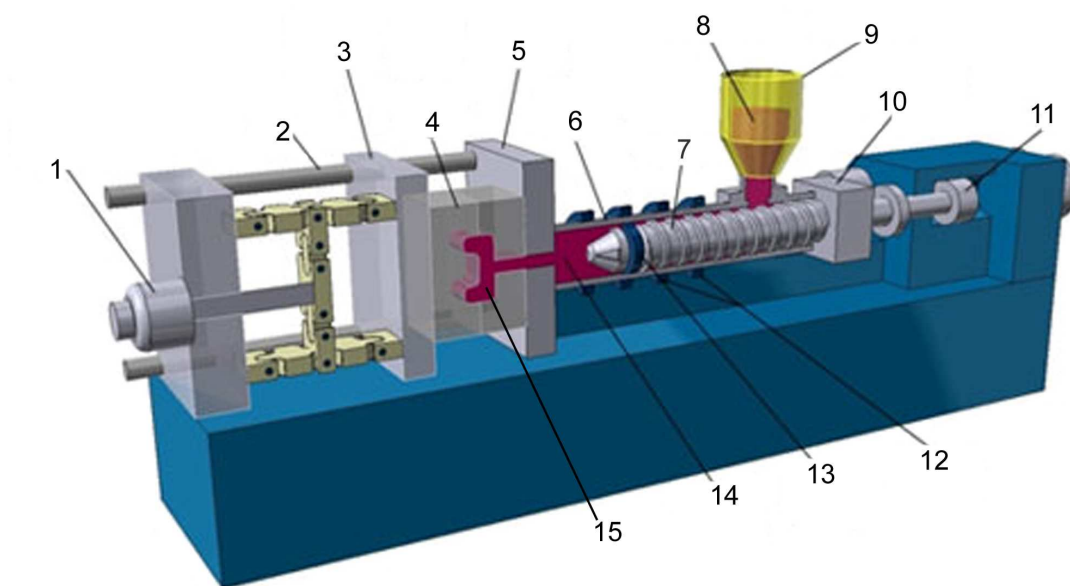
Vrijeme hlađenja plastomernog otpreska i vrijeme očvršćivanja plastomernog otpreska često je dulje od vremena držanja naknadnog pritiska, pripreme taljevine i vraćanja jedinice za ubrizgavanje. Zato je tijekom dopunskog vremena hlađenja ili očvršćivanja jedinica za pripremu taljevine i ubrizgavanje zaustavljena, čekajući početak slijedećeg ciklusa.

Kad se otpresak dovoljno ohladi, kalup se otvara, vadi grozd (otpresak + uljevni sustav) iz kalupne šupljine. Prije novog ciklusa potrebno je stanovito vrijeme za čišćenje i podmazivanje kalupa, ulaganje umetka u kalupnu šupljinu i slične operacije.

3. OSNOVNI DIJELOVI SUSTAVA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE

Osnovni elementi sustava za injekcijsko prešanje su:

- ubrizgavalica
- kalup
- temperiralo.



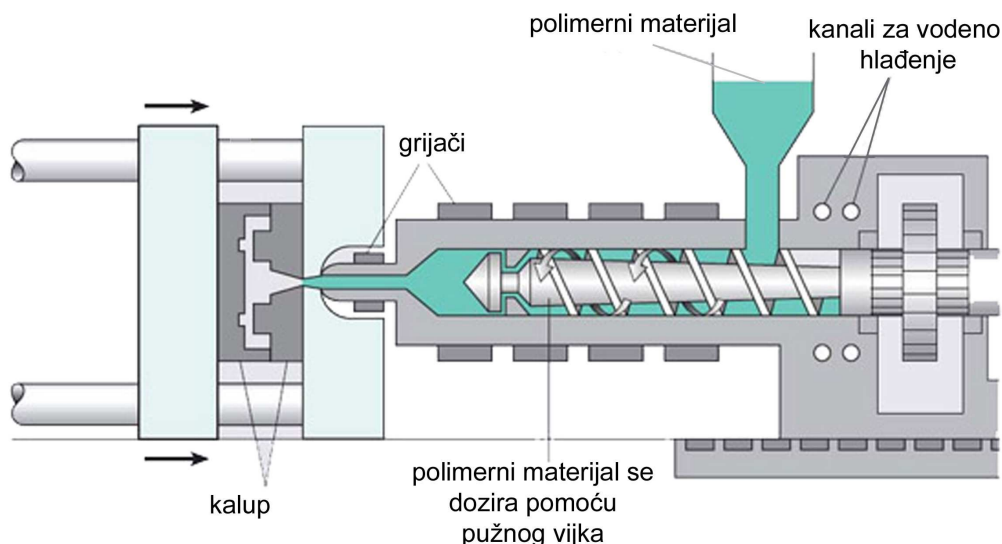
Slika 3.1: Sustav za injekcijsko prešanje [3]: 1 – potisna motka, 2 – priječnica, 3 – pomični nosač kalupa, 4 – kalup, 5 – nepomični nosač kalupa, 6 – cilindar za taljenje, 7 – pužni vijak, 8 – plastomer u čvrstom stanju, 9 – lijevak, 10 – pogonska jedinica, 11 – jedinica za ubrizgavanje, 12 – grijalna, 13 – nepovratni ventil, 14 – taljevina, 15 – otpresak

3.1. Ubrizgavalica [4]

Ubrizgavalica je element koji mora ostvariti više funkcija. To su:

- priprema taljevine za ubrizgavanje
- ubrizgavanje taljevine u kalup
- otvaranje i zatvaranje kalupa
- vađenje otpreska

Ubrizgavalica je univerzalni element sustava jer se njome može izrađivati beskonačan broj različitih otpresaka.



Slika 3.2: Sustav za ubrizgavanje [5]

Svaka ubrizgavalica sastoji se od četiri jedinice. To su:

- jedinica za pripremu i ubrizgavanje taljevine,
- jedinica za zatvaranje kalupa,
- pogonska jedinica,
- jedinica za vođenje procesa i reguliranje.

Jedinica za pripremu taljevine i ubrizgavanje se može smatrati osnovnim dijelom ubrizgavalice. Njegovi su glavni zadaci plastificiranje plastomera radi postizanja potrebne smične viskoznosti, a time i sposobnosti tečenja, a zatim da se približno jednolično zagrijava taljevina velikom brzinom, što znači djelovanjem visokog tlaka, ubrizga u kalupnu šupljinu.

1. **Zatvaranje kalupa** - Zadaća jedinice za zatvaranje kalupa je dovođenje u dodir pomičnog i nepomičnog dijela kalupa, te njihovog održavanja u dodiru tijekom ubrizgavanja i djelovanja naknadnog pritiska, otvaranja kalupa, te vađenje otpreska iz kalupne šupljine. Zatvaranje kalupa može se ostvariti izravno jednim ili sa više hidrauličkih cilindara ili mehaničkim sustavima.
2. **Ubrizgavanje** - Polimerni materijal, obično u obliku praha ili granula, dozira se u stroj za injekcijsko prešanje, te se kreće prema kalupu pomoću pužnog vijka. Tijekom tog procesa, materijal je rastopljen zbog tlaka i topline. Rastaljeni polimerni materijal se tada vrlo brzo ubrizgava u kalup, a stvoreni tlak drži materijal unutar kalupa. Vrijeme ubrizgavanja je teško točno izračunati zbog složenosti i mijenjanja toka rastaljenog polimera u kalupu. Međutim, vrijeme ubrizgavanja može biti procijenjeno uslijed: tlaka ubrizgavanja, snage ubrizgavanja te volumena polimernog materijala koji se ubrizgava.

3. Hlađenje - Rastaljeni polimer koji se nalazi unutar kalupne šupljine počinje se hladiti uslijed kontakta s unutrašnjošću stijenki kalupne šupljine. Kako se polimer hladi, tako će očvrnuti u oblik željenog dijela, otpreska. Međutim, tijekom hlađenja dolazi do skupljanja materijala. Naknadni pritisak, koji slijedi nakon faze ubrizgavanja, omogućava zadržavanje zadanih dimenzija otpreska, koje bi bile narušene zbog stezanja materijala. Kalup se ne bi trebao otvarati ako nije prošlo potrebno vrijeme za hlađenje, jer inače se snižava kvaliteta otpreska. Vrijeme hlađenja može se procijeniti iz nekoliko termodinamičkih svojstava polimera i maksimalne debljine otpreska.
4. Izbacivanje - Nakon što je prošlo dovoljno vremena, ohlađen otpresak će biti izbačen iz kalupa pomoću jedinice za izbacivanje otpreska, koji je vezan za pomični dio kalupa. Kada se kalup otvori, mehanizam se koristi za izbacivanje otpreska iz kalupne šupljine. Kako bi se olakšalo izbacivanje otpreska, unutrašnje površine kalupne šupljine mogu se prije ubrizgavanja materijala poprskati raznim agensima koji će olakšati vađenje otpreska. Vrijeme koje je potrebno za otvaranje kalupa i izbacivanje otpreska može se procijeniti iz suhog ciklusa stroja. Nakon što je otpresak izbačen, kalup se može zatvoriti za sljedeći ciklus ubrizgavanja.

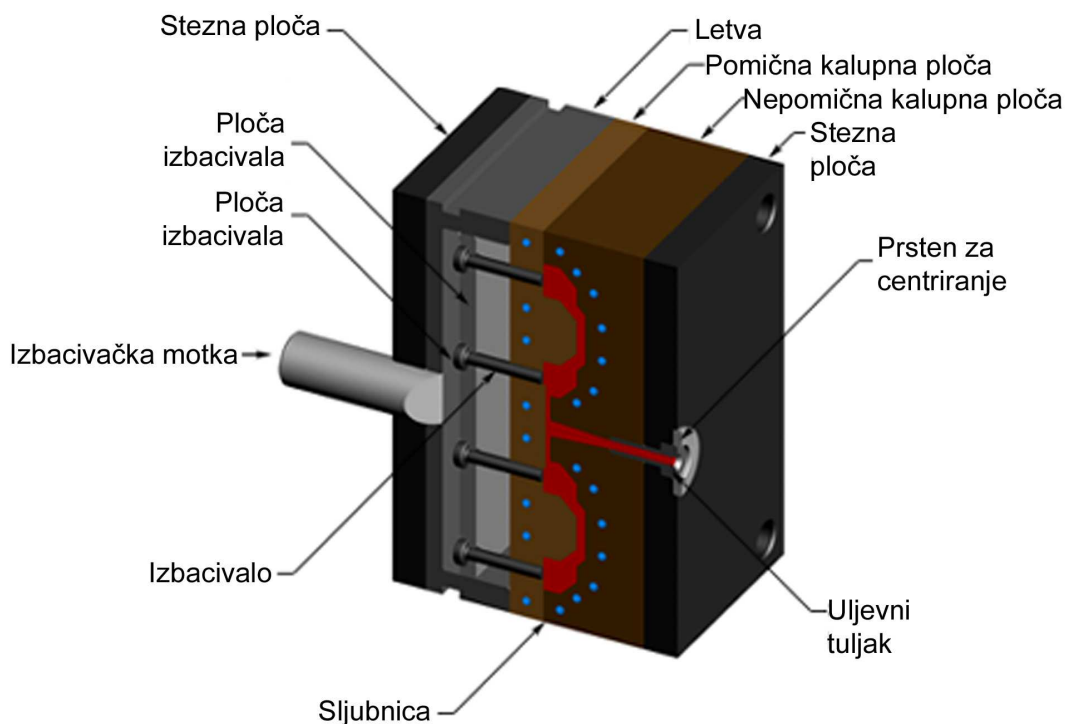
3.2. Kalup za injekcijsko prešanje polimera [4]

Kalup za injekcijsko prešanje polimera je središnji element linije za injekcijsko prešanje polimera. To je kompliciran sustav zbog postojanja većeg broja elemenata, te kompleksan zbog većeg broja relacija među elementima.

Oblikovanje strukture kalupa postiže se oblikovanjem elemenata od kojih se kalup sastoji. Pri tome se teži što većoj funkcijskoj kompleksnosti uz što manju strukturnu kompleksnost kalupa. To znači da se teži ispunjavanju što većeg broja funkcija kalupa pri to manjem broju elemenata koji čine strukturu kalupa. Više o funkcijama kalupa biti će opisano u poglavlju 5. Uz strukturnu kompleksnost kalupa usko su povezani pojmovi normiranja, unifikacije, tipizacije, univerzalnosti i fleksibilnosti kalupa. Slika 3.3 prikazuje osnovne dijelove kalupa za injekcijsko prešanje.

Elementi kalupa su:

- kalupna šupljina
- kućište kalupa
- uljevni sustav
- sustav za temperiranje kalupa
- sustav za vađenje otpresaka iz kalupa
- sustav za vođenje i centriranje elemenata kalupa
- sustav za odzračivanje kalupa



Slika 3.3: Kalup za injekcijsko prešanje sa osnovnim dijelovima [6]

3.2.1. Kalupna šupljina [4]

Kalupna šupljina definirana je kao prostor kojeg zatvaraju pomični i nepomični dijelovi kalupa. Oblik kalupne šupljine je identičan obliku otpreska, a izmjere su joj uvećane za iznos stezanja plastomernog materijala kojeg se prerađuje. Kalupna šupljina je u stvari "negativ" otpreska uvećan za postotak stezanja plastomernog materijala. Na temelju broja kalupnih šupljina kalupe je moguće podijeliti na kalupe s jednom kalupnom šupljinom i kalupe s više kalupnih šupljina. Pri tome, kalupi s više kalupnih šupljina mogu biti namijenjeni izradbi jedne vrste otpresaka ili izradbi više vrsta otpresaka istovremeno (kalup s različitim oblicima kalupnih šupljina).

Funkcija kalupne šupljine je:

- razdioba plastomerne taljevine
- definiranje izmjere otpreska
- prijenos tlaka taljevine u kalupnu šupljinu
- definiranje kvalitete površine otpreska.

Nakon određivanja broja kalupnih šupljina potrebno je definirati njihov pravilan raspored. Pri definiranju rasporeda kalupnih šupljina treba težiti što kraćem i ujednačenom putu od uljevka do svake kalupne šupljine. Različiti putovi tečenja do pojedine kalupne šupljine dovode do različitog stezanja plastomerne taljevine, nejednakih izmjera i različitih uporabnih svojstava otpresaka. U kalupima gdje se ne može postići ujednačeni put tečenja do svih kalupnih šupljina, moguće je taj nedostatak umanjiti uravnoteženjem uljevnog sustava.

Temeljni uvjeti kojih se treba pridržavati pri definiranju rasporeda kalupnih šupljina su:

- ostvarenje najpovoljnijeg rasporeda kalupnih šupljina radi postizanja minimalnih izmjera kalupa
- osiguranje minimalnog puta tečenja taljevine od mjesta dodira mlaznice ubrizgavalice s kalupom do kalupne šupljine
- osiguranje pravilnog rasporeda kalupnih šupljina radi simetričnosti zatvaranja kalupa

Teži se za takvim rasporedom kalupnih šupljina kojim će se najbolje iskoristiti korisni obujam kalupa, s time da putovi tečenja do svih kalupnih šupljina budu ujednačeni i što kraći, kako bi se osigurao što manji otpad materijala zbog uljevnog sustava (u slučaju čvrstog uljevnog sustava). Iz zahtjeva na kvalitetu otpresaka, izravno proizlaze zahtjevi na kvalitetu kalupne šupljine.

3.2.2. Kućište kalupa [4]

Kućište kalupa kao cjelina ispunjava tri parcijalne funkcije: povezivanje dijelova kalupa, pričvršćivanje kalupa na ubrizgavalicu i prihvaćanje i prijenos sila.

Kućište kalupa je slog ploča koji zajedno čine noseću konstrukciju kalupa. U njemu su ugrađeni žigovi, matrice i ostali dijelovi sklopova neophodnih za dobro i ispravno funkcioniranje kalupa.

Na oblik i konstrukcijsku izvedbu kućišta najveći utjecaj imaju oblik i izmjere otpreska, njihova predviđena količina proizvodnje, te predviđeni stupanj automatiziranosti rada kalupa. Pri izboru materijala kućišta kalupa potrebno je izabrati najkvalitetnije raspoložive materijale koji će udovoljiti postavljenim zahtjevima (mogućnost obradbe, toplinska, mehanička i kemijska postojanost, i sl.).

Kalup se dijeli na pomični i nepomični dio. Nepomični dio kalupa nalazi se na strani jedinice za ubrizgavanje taljevine u kalup, dok se pomični dio kalupa nalazi na strani jedinice za otvaranje i zatvaranje kalupa. Linija (površina) koja dijeli te dvije polovice kalupa naziva se sljubnicom. Uglavnom se izrađuju kalupi s jednom sljubnicom, no nisu rijetki kalupi s više sljubnica. Tada se govori o glavnoj i pomoćnim sljubnicama.

Jedan od kriterija pri izradbi kalupa je i samo kućište, tj. vrsta kućišta. Kriterij svrstavanja u skupine prema vrsti kućišta je različitost načina vađenja otpresaka iz kalupa i vrste uljevnog sustava. Budući da je unutar svake skupine moguće razlikovati cijeli niz kalupa prema upotrijebljenim konstrukcijskim rješenjima pojedinih elemenata, potrebno je uvesti dodatne kriterije. Za oznaku vrste kućišta kalupa predviđena je jedna znamenka.

Na temelju analize i pregleda postojećih standardnih kućišta kalupa za injekcijsko prešanje plastomera, moguće je načiniti grubu sistematizaciju kućišta kalup:

- pravokutna kućišta
- okrugla kućišta
- kućišta s postranim otvaranjem kalupnih ploča
- kućišta sa školjkastim kalupnim pločama
- posebna kućišta.

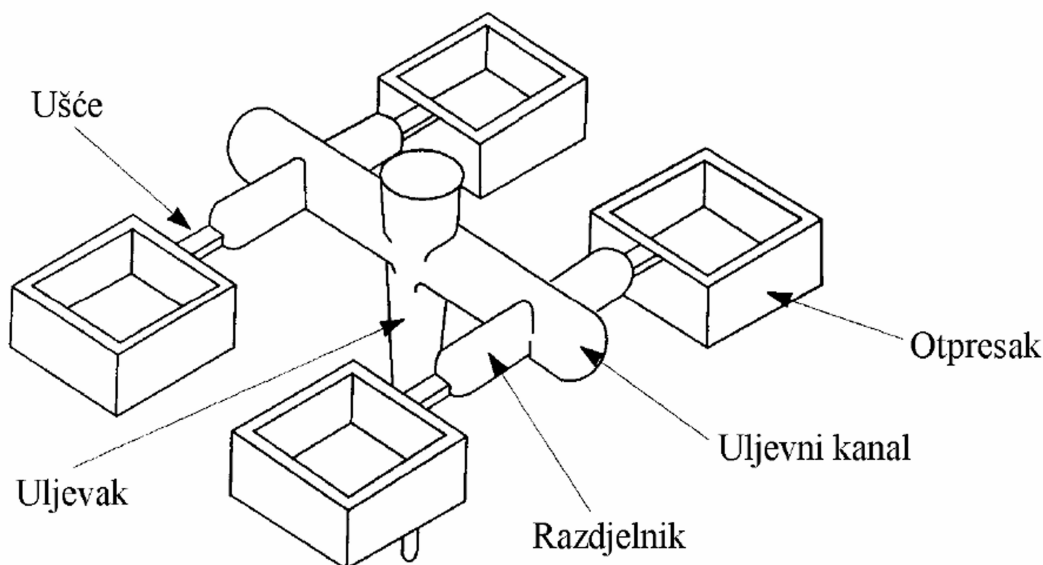
3.2.3. Uljevni sustav [4]

Elementi kalupa koji ispunjavaju parcijalnu funkciju razdjeljivanja plastomerne taljevine na određeni broj kalupnih šupljina u literaturi se nazivaju skupnim imenom – uljevni sustav kalupa. Obzirom na vrstu, uljevni sustav se može sastojati iz nekoliko različitih dijelova, no gotovo svi uljevni sustavi završavaju ušćem prema kalupnoj šupljini. Ušće, dakle, predstavlja povezujući element kalupa između uljevnog sustava i kalupne šupljine. Utjecaj broja, položaja, oblika (vrste) i izmjera ušća na parametre preradbe (injekcijskog prešanja), konstrukciju kalupa i uporabna svojstva otpreska vrlo je velik, pa stoga valja konstrukciji ušća u kalupima posvetiti posebnu pozornost.

Pri kalupima za injekcijsko prešanje razlikuju se tri temeljne vrste uljevnih sustava: čvrsti (hladni) uljevni sustav i kapljeviti (vrući) uljevni sustav, te njihova kombinacija. Dodatno, pri čvrstom uljevnom sustavu moguće je načiniti daljnju podjelu prema vrsti ušća, dok se vrući uljevni sustavi razlikuje prema načinu zagrijavanja pojedinih elemenata sustava i prema vrsti ušća na vrućim mlaznicama. Pri tome, svaki uljevni sustav treba zadovoljiti kriterije koje postavljaju otpresak, vrsta plastomerne taljevine, ubrizgavalica i konstrukcija kalupa.

Mlaznica ubrizgavalice i kalupne šupljine s obličjem otpreska povezane su kanalima različitih dimenzija i oblika. Svi ti otvori između mlaznice ubrizgavalice i kalupne šupljine čine uljevnu šupljinu. Općenito, očvršnuti materijal u uljevnoj šupljini naziva se uljevni sustav, a čine ga uljevak, uljevni kanali, razdjelni kanali, ušća i zdenac.

Ubrizgana polimerna taljevina prolazi kroz uljevak, uljevne kanale i kroz ušće i tako popunjava kalupnu šupljinu. Zbog prolaska polimerne taljevine kroz uljevak i uljevne kanale temperatura taljevine pada, a viskoznost raste, zato zbog ušća generirana toplina trenjem smanjuje viskoznost polimerne taljevine kako ona popunjava kalupnu šupljinu.



Slika 3.4: Grozd [4]

3.2.3.1. Hladni uljevni sustav [4]

Hladni uljevni sustav u kalupu je ohlađen i zbačen sa otpreskom. U svakom ciklusu su proizvedeni uljevni sustav i otpresak. Očita mana ovog postupka je to da se sa svakim ciklusom uzaludno troši materijal. Uljevni sustavi se ili bacaju u otpad, ili regranuliraju i ponovo koriste u mješavini sa novim materijalom. Ali regranulat će povećati varijacije u osnovnom procesu injekcijskog prešanja, i može pogoršati mehanička svojstva korištenog polimera.

Usprkos mana, ima i mnogo prednosti hladnog uljevnog sustava. Konstrukcija kalupa je vrlo jednostavna i mnogo jeftinija od vrućeg uljevnog sustava. Kalup zahtjeva manje održavanja i manje vještine za sklapanje, postavljanje i održavanje. Promjene boje su vrlo jednostavne pošto se sav polimer iz kalupa izbacuje sa otpreskom.

3.2.3.2. Vrući uljevni sustav [4]

Trendovi na tržištu injekcijski prešanih proizvoda nalažu proizvodnju uz što manje gubitaka, odnosno proizvodnju sa što manje otpada. Vrući uljevni sustavi omogućavaju da se na dijelu od mlaznice ubrizgavalice do kalupne šupljine izgubi što manje plastomernog materijala.

Uporaba ovih sustava predstavlja prednost posebice pri izradbi vrlo malih otpresaka, jer u tom slučaju količina materijala u uljevnom sustavu može predstavljati veliki udio ukupno ubrizgane plastomerne taljevine. Pri preradbi velikih otpresaka, obično se rabe dugački

uljevni kanali, što pri uporabi čvrstog uljevnog sustava predstavlja veće gubitke plastomernog materijala. Vrući uljevni sustavi zahtijevaju dulje vrijeme konstruiranja i izradbe kalupa, te više troškove izradbe od kalupa s čvrstim uljevnim sustavom. S druge strane, cijena izradbe otpresaka u kalupima s vrućim uljevnim sustavom znatno je snižena. Uporabom vrućih uljevnih sustava omogućuje se i bolje tečenje taljevine kroz uljevni sustav, čime se omogućuje minimiranje debljine stijenke sa stajališta tečenja. Otpresci izrađeni u kalupima s vrućim uljevnim sustavima ne zahtijevaju naknadnu obradbu odvajanjem otpresaka od uljevnog sustava, a otisak ušća sveden je na vrlo malu površinu. Pri izboru vrućeg uljevnog sustava, potrebno je poznavati neke od prednosti i nedostataka uporabe ovog sustava u odnosu na čvrsti uljevni sustav, što je prikazano u tablici 3.1.

Tablica 3.1: Gospodarske i tehničke prednosti i nedostaci vrućih uljevnih sustava [4]

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> - ušteda materijala i manji troškovi preradbe (nema otpada) - ušteda energije (moguća preradba pri nižim temperaturama) - kraće vrijeme ubrizgavanja - nema negativnog utjecaja grozda na vrijeme hlađenja otpreska - kraće vrijeme vađenja otpreska iz kalupa - kraći ciklus injekcijskog prešanja - manje opterećenje ubrizgavalice - uporaba standardnih elemenata kalupa - povišenje kvalitete otpresaka - nema potrebe za naknadnim odvajanjem uljevnog sustava od otpreska - moguće ostvariti dulji put tečenja taljevine - jednostavnija je automatizacija ciklusa injekcijskog prešanja - manji pad tlaka u uljevnom sustavu - moguće podesiti dulje djelovanje naknadnog pritiska (manje stezanje) 	<ul style="list-style-type: none"> - dulje vrijeme konstruiranja kalupa - dulje vrijeme izradbe kalupa - viša cijena kalupa - potrebno je školovano i osposobljeno osoblje - veća vjerojatnost zastoja u radu kalupa - potrebno je dodatno usklađivanje vrućih elemenata temperaturnim regulatorom - dodatni uređaji osjetljiviji su na neispravno rukovanje - smanjena mogućnost brtvljenja uljevnog sustava - poteškoće u odvajanju toplijeg i hladnijeg dijela kalupa - lošija izmjena topline u kalupu - opasnost od toplinske razgradnje plastomerne taljevine - opasnost od nejednolikog punjenja kalupnih šupljina zbog lošeg temperiranja kalupa - nemogućnost upravljanja tijekom tlaka u području ušća

3.2.4. Sustav za temperiranje kalupa [4]

Sustav za temperiranje uljevine šupljine kalupa i kalupne šupljine ispunjava parcijalnu funkciju reguliranja temperature u kalupnoj i uljevnoj šupljini. Pod temperiranjem se podrazumijeva postizanje propisane temperature stijenke kalupne šupljine, bez obzira treba li se pri tome toplina kalupu dovoditi ili odvoditi. Cilj je propisana temperatura stijenke kalupne šupljine, a način njena postizanja ovisi o stvarnim uvjetima, što dovodi do potrebe zagrijavanja ili hlađenja kalupa. Toplina se kalupu može dovoditi i odvoditi kapljevinama, a grijalima samo odvoditi.

Pravilna izmjena topline u kalupu odlučujuće utječe na uspješno odvijanje i trajanje ciklusa injekcijskog prešanja. Osnovno načelo, koje određuje uspješnost preradbe plastomera injekcijskim prešanjem je optimiranje temperaturne razlike između temperature taljevine i temperature stijenke kalupne šupljine. Sa stajališta kvalitete otpresaka poželjno je da razlika između tih temperatura bude što manja, a proizvodnost zahtjeva što veću temperaturnu razliku.

Općenito moguće je razlikovati predtlačno i podtlačno temperiranje kalupa. Obzirom na elemente sustava za temperiranje razlikuju se:

- temperiranje s pomoću medija za temperiranje (vodena para, plin, ulje, voda, voda s dodacima)
- elektrootporno temperiranje
- indukcijsko temperiranje
- poluvodičko temperiranje.

Pri kalupima za injekcijsko prešanje plastomera najčešće se rabi temperiranje s pomoću medija. Na izbor medija i opreme za temperiranje utječu potrebna svojstva otpreska i željena proizvodnost. Potrebna temperatura stijenke kalupne šupljine posredna je veličina, koja određuje brzinu i temperaturu medija.

3.2.4.1. Podtlačno temperiranje kalupa

Zaostali zrak i razvijeni plinovi u kalupnoj šupljini ili kanalima za temperiranje, posebno kod dubokih jezgri i gnijezda, mogu stvoriti velike teškoće tijekom preradbe. Zatvoreni zrak u kalupnoj šupljini može bitno sniziti kvalitetu proizvoda, pa čak dovesti do lokalnog pregaranja otpreska. Zračni „džepovi“ u krugovima za temperiranje dovode do nejednolike izmjene topline, što se vrlo brzo otkriva kao nedostatak, a izravna posljedica su produženi ciklusi preradbe ili snižena kvaliteta otpresaka.

Podtlačno temperiranje omogućuje istovremeno sastavljanje kruga za otplinjavanje i temperiranje. Ako se ovim mogućnostima podtlačnog temperiranja pridoda i povišenje

sigurnosti u radu s temperiranjem, jer ako i dođe do nastajanja otvora u crijevima, nema istjecanja medija, potpuno je razumljivo da se predviđa velika budućnost tom načinu temperiranja kalupa.

3.2.4.2. Predtlačno temperiranje kalupa

Pri uporabi ovog načina temperiranja kalupa, medij za temperiranje prolazi sa određenim predtlakom kroz krugove za temperiranje. Predtlačno temperiranje zahtjeva visoku nepropusnost kruga za temperiranje, što zahtjeva posebno brtvljenje dijelova sustava za temperiranje. Do unazad nekoliko godina predtlačno temperiranje s vodom kao medijem za temperiranje bio je najčešći način temperiranja kalupa. Međutim, s vremenom su se razvili i drugi sustavi u kojima se kao medij pojavljuju ulja i plinovi (npr. CO₂).

Sustav kanala za temperiranje naziva se krug za temperiranje. Pri sastavljanju krugova za temperiranje treba obratiti pozornost na to treba li kalup hladiti ili zagrijavati. Pri preradbi plastomera češće je hlađenje kalupa, pa je ulazna temperatura medija za temperiranje niža od izlazne, jer se medij zagrijava prolaskom kroz krug za temperiranje. U tom se slučaju najhladniji medij dovodi na mjesto najtoplije taljevine, tj. na mjesto ušća. Medij izlazi na mjestu najhladnije taljevine. Kako to nije uvijek moguće izvesti, ponekad se uvodi više krugova za temperiranje, koji su nezavisno regulirani.

Krugove za temperiranje (predtlačno i podtlačno) moguće je podijeliti na krugove za temperiranje elementa kalupne šupljine koji oblikuju unutrašnji dio otpreska, te na krugove za temperiranje elementa kalupne šupljine koji oblikuju vanjski dio otpreska. Stoga se uvodi podjela krugova za temperiranje na:

- krugove za temperiranje gnijezda i kalupnih ploča
- krugove za temperiranje žigova i jezgra

Krugovi za temperiranje gnijezda i kalupnih ploča služe temperiranju dijelova kalupa s pomoću kojih se otpresku daje vanjski oblik. Njima se temperiraju približno pločasti otpresci i to krugovima za temperiranje u obliku slova U, Z, kao i pravokutnika. Cilindrična gnijezda zahtijevaju ponešto drugačiju izvedbu kanala za temperiranje. Za otpreske veće visine, primjenjuje se više krugova za temperiranje Z oblika. Ploče s umetcima temperiraju se tako da se izvedu posebni krugovi za temperiranje i u umetcima. Krugovi za temperiranje žigova i jezgara služe temperiranju dijelova kalupa, kojima se daje unutrašnji oblik otpreska. U kalupima s više kalupnih šupljina, krugovi za temperiranje žigova mogu se izvesti kao serijski ili paralelni. Razlikuje se također temperiranje pravokutnih i kružnih žigova i jezgara. Osim kapljevina kao medij za temperiranje žigova i jezgara može poslužiti i zrak i to za vrlo tanke jezgre.

Osim klasičnih krugova za temperiranje, na tržištu se pojavio i novi tzv. Contura krug za temperiranje. Osnovna karakteristika tog sustava za temperiranje su kanali za temperiranje koji prate oblika kalupne šupljine. Takav oblik kanala za temperiranje omogućuje bitno skraćenje ciklusa injekcijskog prešanja (i do 30%), jednoliko temperiranje kalupne šupljine, te postizanje poboljšane kvalitete otpreska. Također je razvijen i sustav sa savitljivim elementima za temperiranje. Elementi su izrađeni od elastičnih bakrenih cijevi koje se mogu oblikovati čak i rukom. Na taj način element za temperiranje može poprimiti željeni oblik potreban za temperiranje različitih kalupa.

3.2.5. Sustav za vađenje otpreska iz kalupne šupljine [4]

Sustav za vađenje otpreska iz kalupa obavlja parcijalnu funkciju otvaranja kalupa i vađenja otpreska iz kalupne šupljine. Pri tome on treba udovoljiti sljedećim zahtjevima:

- vađenje otpresaka bez oštećivanja
- ostavljanje što je moguće manje vidljivih otisaka na otpresku
- jednoliko vađenje otpresaka
- pravilno postavljeni elementi za vađenje otpresaka
- pravilna koordinacija elemenata sustava za vađenje otpresaka sa sustavom za temperiranje kalupa.

Nepravilno vađenje otpreska iz kalupne šupljine može dovesti do katastrofalnih kvarova, kao što su kidanja mehaničkih dijelova ubrizgavalice ili kalupa. Konstruktor kalupa može mnogo učiniti pri konstruiranju kalupa kako bi se ti kvarovi spriječili. To se može izbjeći pravilnim dimenzioniranjem opterećenih elemenata kalupa. Tipična, vrlo česta pogreška je lom nedovoljno dimenzioniranih izbacivala, što se može izbjeći primjenom izbacivala većeg promjera. Ispravnim vođenjem ploča izbacivala i pločastih skidala također se uklanja učestala greška pri vađenju otpresaka. To je nepodešenost prema provrtima, što dovodi do savijanja izbacivala i prevelikog trošenja provrta.

Na temelju analize postojećih poznatih sustava i načina njihovog funkcioniranja, svi se sustavi za vađenje otpreska mogu podijeliti u one, koji sustavni dio kalupa (elementi kalupa) i u one koji djeluju izvan kalupa kao dio dopunske opreme (manipulatori, roboti ili ručno vađenje otpreska). Prema načinu djelovanja sustavi za vađenje otpresaka mogu se podijeliti na: mehaničke, pneumatske, hidrauličke i mješovite. Kod kalupa za injekcijsko prešanje plastomera danas se najčešće upotrebljavaju sustavi s mehaničkim načinom vađenja, a rjeđe ostali načini kod posebnih otpresaka ili posebnih konstrukcija kalupa.

3.2.6. Sustav za vođenje i centriranje elemenata kalupa [4]

Kako bi se osiguralo točno nalijezanje jednog dijela kalupa na drugi, rabe se različiti sustavi za vođenje i centriranje elemenata kalupa. Pri tome valja razlikovati vanjsko i unutrašnje centriranje.

Vanjsko centriranje kalupa potrebno je radi točno g pozicioniranja kalupa na nosače kalupa ubrizgavalice, a izvodi se pomoću prstena za centriranje, odnosno razdijeljenog prstena za centriranje u slučaju kada na steznim pločama kalupa postoji izolacija. Prsten za centriranje omogućuje lako postavljanje kalupa na ubrizgavalicu, tako da se od uljevnog tuljca kalupa i os mlaznice ubrizgavalice podudaraju.

Sustav za unutrašnje vođenje i centriranje kalupa služi za vođenje i centriranje kalupnih ploča i ostalih elemenata kalupa pri otvaranju i zatvaranju kalupa.

3.2.7. Sustav za odzračivanje kalupa [4]

Sustav za odzračivanje kalupa potreban je stoga, što prilikom ubrizgavanja plastomerne taljevine u zatvorenu kalupnu šupljinu, u njoj zaostaju zrak i plinovi. Oni ometaju potpuno popunjavanje kalupne šupljine i mogu utjecati na lošu kvalitetu otpreska. Odzračivanje kalupne šupljine naročito je važno tijekom faze ubrizgavanja, jer povišenje temperature zbog snižene viskoznosti taljevine uzrokuje veću brzinu ubrizgavanja. To nadalje uzrokuje nedovoljnu učinkovitost prirodnog odzračivanja, pa se u posebnih slučajevima mora primijeniti podtlačno odzračivanje s pomoću posebnog uređaja.

Pri definiranju elemenata sustava za odzračivanje potrebno je osigurati što je moguće veće elemente za odzračivanje, ali ne prevelike, te ih predvidjeti na kraju svih putova tečenja taljevine u kalupnoj šupljini, kao i na mjestima linija spajanja čela taljevine. Vrlo je važno i čišćenje elemenata za odzračivanje. Pomični elementi (npr. izbacivala) obično se čiste sami, dok je nepomične elemente potrebno čistiti.

Veličina kanala i utora za odzračivanje ovisi o obujmu ubrizgane plastomerne taljevine i brzini ubrizgavanja. U pravilu, kanali za odzračivanje postavljaju se nasuprot ušća, odnosno na mjestu stijenke kalupne šupljine, koje je najudaljenije od ušća. Otvori za odzračivanje trebaju biti izvedeni tako da taljevina ne može ulaziti u njih i na taj ih način zatvoriti. Odzračivanje kalupne šupljine moguće je ostvariti na više načina. Najčešće je odzračivanje kroz provrte za vođenje izbacivala. Postoji i čitav niz posebnih izvedbi odzračivanja kalupne šupljine ovisno o specifičnim zahtjevima koje postavlja otpresak. U novije vrijeme razvijeno je nekoliko materijala za kalupne ploče koji se izrađuju sraščivanjem metalnog praha. Takvi, porozni materijali omogućuju odzračivanje kalupnih šupljina izravno kroz kalupne ploče.

4. POSEBNOSTI TANKOSTJENOG INJEKCIJSKOG PREŠANJA

U naporima da se za istu namjenu troši sve manje materijala, a time i energije, tankostjeno injekcijsko prešanje nameće se kao suvremeno rješenje. Osnovno obilježje tankostjenog injekcijskog prešanja je visoki tlak ubrizgavanja, zbog čega ubrizgavalice i kalupi nisu standardnih izvedbi. U ovom poglavlju pretežno su razmotrene posebnosti postupaka i elemenata tankostjenog injekcijskog prešanja.

4.1. Opis postupka

Postupak injekcijskog prešanja tankostjenih plastomernih proizvoda u pravilu se ne razlikuje od klasičnog postupka injekcijskoga prešanja plastomernih taljevina.^[7]

Kod tankostjenog injekcijskog prešanja plastomernih otpresaka dolazi do izražaja oblik, odnosno debljina stijenke otpreska. Debljina stijenke izravno utječe na uvjete preradbe, izbor ubrizgavalice i temperirala. Nekoć je konvencionalno bilo definirano da debljina stijenke za tankostjeno injekcijsko prešanje ne smije prelaziti 1 mm ukoliko je površina otpreska najmanje 50 cm² ili da je omjer duljine i debljine toka taljevine veći od 100 ili 150. No, s obzirom da svaki polimerni materijal posjeduje vlastita svojstva tečenja, teško je govoriti o konvencionalnoj granici tankostjenog injekcijskog prešanja ne uzimajući u obzir svojstva pojedinih polimernih materijala. Tablica 4.1 prikazuje omjere debljine i duljine toka taljevine nekih polimernih materijala, pri čijim vrijednostima se smatra da počinje tankostjeno injekcijsko prešanje.

Tablica 4.1: Omjer debljine i duljine toka taljevine tankostjenog injekcijskog prešanja [8]

Materijal	Omjer debljine i duljine toka taljevine
ABS	1:170
SAN	1:120
PA	1:150
PC	1:100
PE-HD	1:225
PE-LD	1:275
PP	1:250
PMMA	1:130
POM	1:150
PS	1:200

Otpresci tankostjenog injekcijskog prešanja su lakši, kompaktniji, te niži cijenom zbog njihovog bržeg hlađenja. [9]

4.2. Izbor materijala [7]

Pri razvoju tankostjenoga proizvoda od ideje do prototipa jedan je od kritičnih koraka izbor materijala. Pogrešan materijal može značiti neuspjeh proizvoda na tržištu ili stvoriti velike teškoće tijekom proizvodnje. Materijal se izabire izlučivanjem (eliminacijom). Na osnovi traženih uporabnih svojstava otpreska izabire se materijal koji optimalno zadovoljava postavljene zahtjeve na proizvodna svojstva materijala i uporabna svojstva otpreska. To zahtijeva detaljno poznavanje karakteristika materijala i njegovoga ponašanja u okolini za koju je namijenjen otpresak. Zadatak je tim teži što u bazama podataka postoji gotovo 30 tisuća tipova plastičnih materijala.

Debljina stijenke otpreska i zahtjevi koji se postavljaju na materijal tog otpreska obrnuto su proporcionalne veličine. To znači – što je tanja stijenka to su zahtijevane vrijednosti pojedinih svojstava materijala više. Materijali iz skupine plastomera koji se rabe za tankostjeno injekcijsko prešanje odlikuju se visokim vrijednostima žilavosti, čvrstoće, zadovoljavajuće postojanosti pri povišenoj temperaturi i dimenzijske točnosti i preciznosti. Uz to, bitna su i njihova preradbena svojstva.

4.3. Uvjeti preradbe

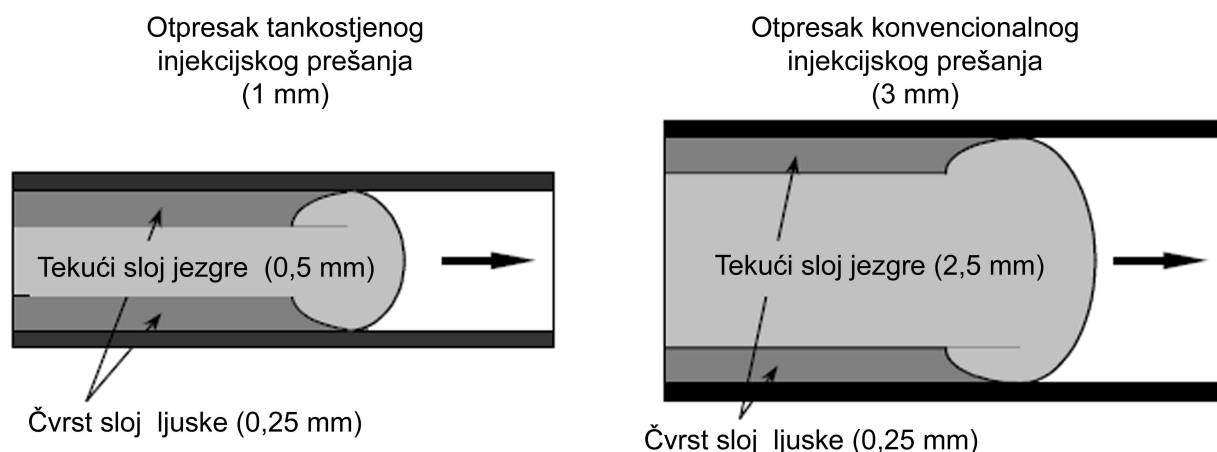
Za tankostjeno injekcijsko prešanje plastomernih otpresaka svojstveno je usko polje preradbenih parametara. Uz uvjet da su otpresak i kalup optimirani za tankostjeno prešanje, još uvijek postoje poteškoće pri određivanju svojstvenih veličina.

Za izradbu tankostjenih otpresaka mogu se iskoristiti vrijednosti preporučenih temperatura stijenke kalupne šupljine i polimerne taljevine kao i kod klasičnih postupaka. Razlika je samo u tome da se kod tankostjenih otpresaka izabiru vrijednosti bliže gornjoj granici temperaturnoga polja u svrhu smanjenja potrebnoga tlaka ubrizgavanja. [7]

Bez obzira na debljinu otpreska slojevi ljuske su uvijek debljine oko 0,25 mm. To znači da je kod tankostjenog injekcijskog prešanja protočni kanal vrlo uzak (slika 4.1), zbog čega je i otpor protoku vrlo velik. [9]

Smanjenje otpora protoka se može postići na više načina:

- povećanjem temperature taljevine ili stijenke kalupne šupljine,
- smanjenjem viskoznosti taljevine (povećanjem indeksa taljevine),
- povećanjem tlak ili brzine ubrizgavanja.



Slika 4.1: Razlika između tankostjenog i konvencionalnog injekcijskog prešanja [9]

Međutim, povišenje temperature taljevine i njen dulji boravak u cilindru zbog povećanog vremena hlađenja može uzrokovati degradaciju polimernog materijala. Kako bi se izbjeglo prijevremeno očvršćivanje polimerne taljevine poželjne su velike brzine ubrizgavanja i izuzetno visok tlak ubrizgavanja (2 000 – 2 500 bar). Zbog tanke stijenke otpreska, hlađenje je brzo. Kombinacija brzog hlađenja i visoke brzine taljevine (kratko vrijeme punjenja kalupne šupljine) značajno smanjuje vrijeme ciklusa. Uobičajene vrijednosti vremena ubrizgavanja su 0,5 - 1 s, dok ciklus tankostjenog injekcijskog prešanja traje 6-20 s, za razliku od konvencionalnog ciklusa injekcijskog prešanja koji traje 40-60 s. [9]

Već prije spomenuti, visoki tlak ubrizgavanja uzrokuje da ubrizgavalice rade na svojim gornjim granicama tehničkih mogućnosti. Stoga je kod ovog postupka potrebno posvetiti posebnu pažnju prerađbenim parametrima, a i samomu izboru ubrizgavalica za tankostjeno injekcijsko prešanje.

Pri ubrizgavanju taljevine hod pužnoga vijka treba biti u optimalnomu području od jednoga do tri promjera pužnoga vijka. U protivnome može doći do oštećivanja polimernoga materijala zbog dugoga vremena provedenoga u cilindru pri visokoj temperaturi. Posljedica toga je uporaba ubrizgavalica koje nisu standardnih karakteristika, te su znatno skuplje.

4.4. Ubrizgavalica za tankostjeno injekcijsko prešanje [7]

Velike brzine ubrizgavanja koje moraju postići ubrizgavalice za tankostjeno injekcijsko prešanje osiguravaju da taljevina ne očvrсне prije nego se ispuni cijela kalupna šupljina. Ubrizgavalice sa silom držanja kalupa manjom od 1 500 kN postižu brzine ubrizgavanja u vrijednostima oko 100 mm/s.

Moguća su tri načina povećanja brzine ubrizgavanja:

- izborom pumpe većeg kapaciteta,
- regeneracijom, odnosno rekonstrukcijom i izborom odgovarajuće opreme s promjenljivim promjerom cilindra za ubrizgavanje,
- dodavanjem tlačnoga akumulatora.

Brzina i protok ubrizgavanja karakteristične su veličine ubrizgavalice koje pokazuju može li se neka ubrizgavalica rabiti za tankostjeno injekcijsko prešanje. Obje veličine, ili jedna od njih redovito se nalaze na popisu karakteristika koje daje proizvođač strojeva, no pri usporedbi ubrizgavalica pravilnije je kao kriterij koristiti brzinu ubrizgavanja jer ona ne ovisi o promjeru pužnog vijka.

U svrhu povećanja brzine ubrizgavanja pojedini proizvođači ubrizgavalica povećavaju snagu hidraulične pumpe. Veća pumpa zahtijeva i veći pogonski motor kako ne bi došlo do njegova preopterećenja.

Rekonstrukcijom ubrizgavalice preusmjerava se radni medij iz stražnjeg dijela cilindra u prednji, čime se ubrzava gibanje klipa. Kod ubrizgavalica se regeneracija, odnosno rekonstrukcija često rabi za ubrzavanje zatvaranja kalupa. Drugi način uporabe regeneracije je za optimiranje brzine ubrizgavanja. Kod tih ubrizgavalica postoji mogućnost i isključenja funkcije regeneracije. Postupkom regeneracije obično se postiže rast brzine ubrizgavanja do 60 %.

Postupak promjenljive veličine cilindra za ubrizgavanje temeljen je na sličnim načelima kao i regeneracija. Na račun sniženja tlaka ubrizgavanja povećava se brzina ubrizgavanja. Međutim, za razliku od regeneracije, postupak promjenljive veličine cilindra ima veći broj različitih kombinacija, a samim time i izbor većeg broja brzina ubrizgavanja. Uporabom triju različitih veličina cilindra dobije se sedam mogućih kombinacija. Primjena toga postupka ovisi o tome zadovoljava li kombinacija vrijednosti brzine ubrizgavanja i tlaka ubrizgavanja potrebe tankostjenog injekcijskog prešanja.

Za povećanje brzine ubrizgavanja najčešće se rabi tlačni akumulator. Za razliku od regeneracije i postupka promjenljive veličine cilindra za ubrizgavanje, kod akumulatora ne dolazi do sniženja tlaka ubrizgavanja na račun rasta brzine ubrizgavanja. Tijekom faze hlađenja otpreska, kada nema gibanja dijelova ubrizgavalice, tok radnoga medija iz pumpe puni akumulator stlačenim radnim medijem. Tako pohranjena tlačna energija oslobađa se tijekom ubrizgavanja. Moguće je i upotreba odvojene pumpe kojoj je zadatak punjenje akumulatora radnim medijem. Pri ubrizgavanju dolazi do sjedinjavanja tokova iz pumpe i iz akumulatora u jedan kombinirani tok.

4.5. Kalup za tankostjeno injekcijsko prešanje [7]

Pri konstruiranju kalupa za tankostjeno injekcijsko prešanje treba imati na umu dvije vrlo važne činjenice. Tlak ubrizgavanja taljevine, a samim time i tlak u kalupnoj šupljini mogu biti vrlo visoki, isto kao i brzina ubrizgavanja, odnosno brzina cijelog procesa može biti vrlo brza. Ta dva parametra mogu izazvati savijanje ploča kalupa.

Zbog toga u tankostjenom injekcijskom prešanju odlučujući faktori, o kojima ovisi vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja, su čvrstoća kalupa, sustav za izbacivanje, vrsta i raspored ušća i kanala za temperiranje. Zbog viših vrijednosti tlakova u kalupnoj šupljini kalup treba biti krući i čvršći od klasičnih. Velike brzine ubrizgavanja mogu dovesti do pojačanoga trošenja stijenki kalupne šupljine, stoga treba uzeti u obzir pri konstruiranju kalupa i izbor odgovarajućeg materijala za dijelove u dodiru s taljevinom. Smanjenje dimenzija otpreska i zahtijevana povišena preciznost i točnost otpreska također utječu na konstrukciju kalupa. Problemi zbog deformiranja kalupa, odzračivanja kalupne šupljine, nužne uporabe specijalnih materijala za izradbu dijelova kalupne šupljine, problema sa sastavom za izbacivanje otpresaka, izbora pravilne vrste uljevnoga sustava, broja i rasporeda ušća, kanala i medija za temperiranje – bitno produljuju vrijeme izradbe kalupa i povisuju njegovu cijenu.

Pravilni izbor vrste uljevnoga sustava i sam položaj kalupnih šupljina bitno utječu na pravilno punjenje kalupne šupljine i na vrijednost skupljanja. Broj ušća određuje se za svaki otpresak posebno. Veći broj ušća znači i niži tlak ubrizgavanja. Ušća treba tako smjestiti da se izbjegne nejednoliko punjenje kalupnih šupljina. Naime, zbog velikoga tlaka ubrizgavanja kod tankostjenih otpresaka nejednolikost punjenja i poteškoće koje iz toga proizlaze dolaze još više do izražaja. Kod otpresaka koji imaju stijenke različitih debljina problemi najranije nastaju kod najtanjih stijenki. Sa stajališta punjenja kalupne šupljine poželjno je da ušća imaju što je mogući veći presjek. Time se izbjegava nepotpuno punjenje kalupa. Uporabom vrućih uljevnih sustava omogućuje se i bolje tečenje taljevine kroz uljevni sustav, čime se debljina stijenke smanjuje na najmanju moguću mjeru sa stajališta tečenja (radi postizanja odgovarajuće popunjenosti kalupne šupljine). Otpresci izrađeni u kalupima s vrućim uljevnim sustavima ne zahtijevaju naknadnu obradbu nakon odvajanja otpresaka od uljevnoga sustava.

Potrebno je koristiti više izbacivala jer su otpresci usko grupirani. Kako bi se izbjegnula deformacija otpreska obično se koriste izbacivala većeg promjera. Katkada je poželjno koristiti vakuumsko izbacivanje otpreska, kako bi se smanjile linije zavora i mogućnost zapaljenja stlačenog plina. No, u većini slučajeva ovaj problem je moguće riješiti odzračivanjem izbacivala duž sljubnice.

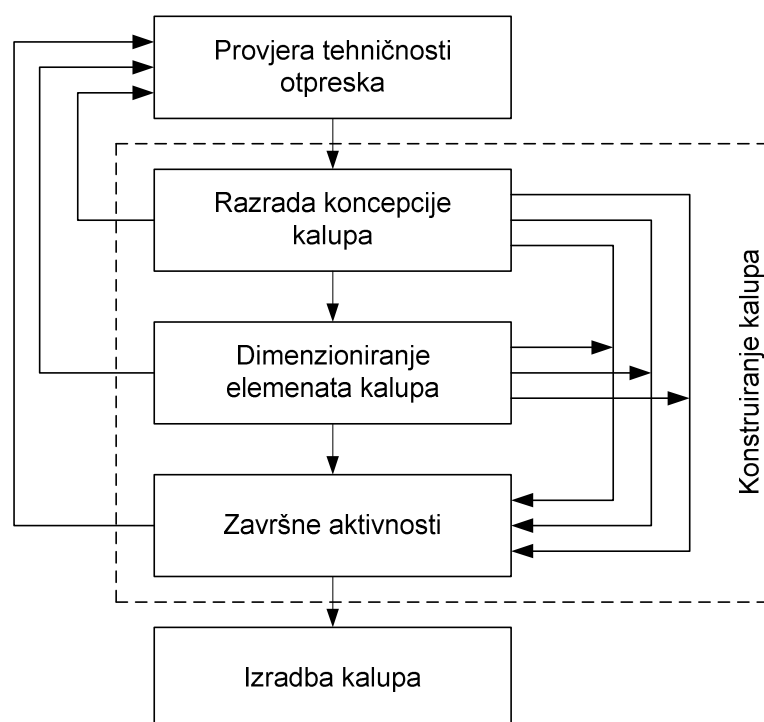
5. METODIČKO KONSTRUIRANJE KALUPA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE

Svaki otpresak moguće je izraditi u većem broju kalupa različitih konstrukcija. Međutim, uvijek postoji jedna konstrukcija koja najbolje odgovara postavljenim tehničkim, gospodarskim i ostalim zahtjevima na izradbu otpreska.

Pri konstruiranju kalupa potrebno je proizvesti niz radnji koje se temelje na analizi ukupne i parcijalnih funkcija kalupa. Metodičko konstruiranje kalupa moguće je definirati kao sistematizaciju radnji koje treba provesti kako bi se ubrzao proces konstruiranja kalupa i smanjila mogućnost donošenja pogrešnih odluka i loših konstrukcijskih rješenja.

5.1. Aktivnosti tijekom konstruiranja kalupa za injekcijsko prešanje

Aktivnosti tijekom konstruiranja moguće je podijeliti u tri temeljne faze: fazu razrade koncepcije kalupa, središnju fazu dimenzioniranja kalupa, te fazu izradbe dokumentacije kalupa.



Slika 5.1: Temeljne faze konstruiranja kalupa za injekcijsko prešanje plastomera [10]

Unutar svake faze konstruiranja prikazane na slici 5.1 potrebno je provesti veći broj aktivnosti konstruiranja, te će u daljnjem radu biti obrađene sve aktivnosti, mogućnost izvođenja i optimiranja, te njihov redoslijed izvođenja.

5.2. Funkcija kalupa za injekcijsko prešanje plastomera [11]

Ukupnu funkciju kalupa za injekcijsko prešanje plastomera moguće je definirati kao praoblikovanje i prastrukturiranje plastomera u zadani makrogeometrijski oblik i zadanu kakvoću površine plastomerne tvorevine.

Tijekom ispunjavanja ukupne funkcije kalupa, plastomerni se granulat na ulazu uz dovodenje energije i informacija prevodi u tvorevinu (otpresak) na izlazu.

Ukupna funkcija kalupa može se podijeliti na parcijalne funkcije. Parcijalne funkcije moraju biti dovoljno niskog stupnja kompleksnosti, tako da je za izvršenje svake od njih moguće pronaći odgovarajuće načelo.

Parcijalne funkcije kalupa su:

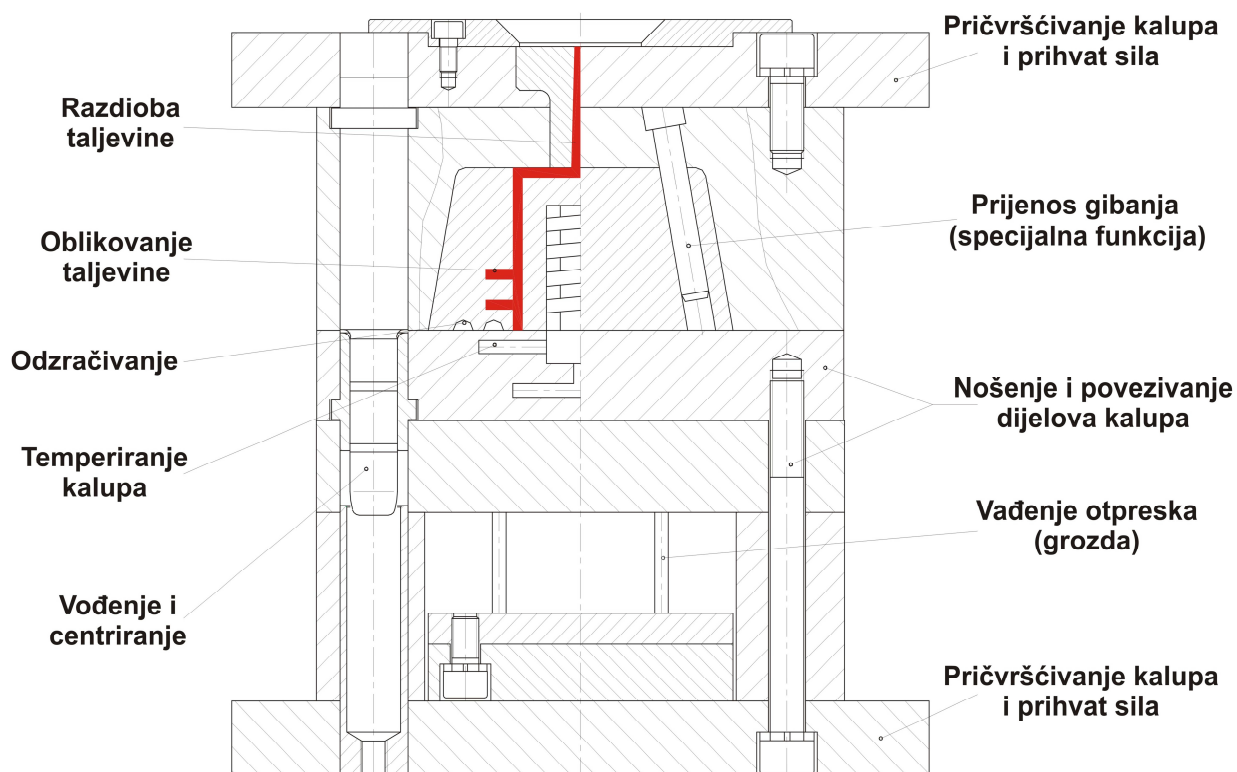
- 1) razdijeliti taljevinu
- 2) oblikovati taljevinu,
- 3) održavati propisano temperaturno polje u kalupu,
- 4) odzračiti kalupnu šupljinu,
- 5) izvaditi grozd iz kalupne šupljine,
- 6) voditi i centrirati dijelove kalupa,
- 7) pričvrstiti kalup za ubrizgavalicu,
- 8) prihvatiti i prenijeti sile,
- 9) povezati elemente kalupa,
- 10) posebne funkcije kalupa.

U tablici 5.1 prikazan je redoslijed izvršavanja pojedinih parcijalnih funkcija kalupa za injekcijsko prešanje polimernih tvorevina. Osim parcijalnih funkcija kalupa za injekcijsko prešanje u tablici su navedeni su i nazivi elemenata za izvršavanje određenih parcijalnih funkcija. Rješenja tih elemenata mogu biti različita, zbog čega je glavni zadatak konstruiranja kalupa pronalaženje i razrada varijanti rješenja za pojedine elemente kalupa.

Tablica 5.1: Parcijalne funkcije kalupa za injekcijsko prešanje i odgovarajući elementi [11]

	Parcijalna funkcija	Element kalupa
Temeljne parcijalne funkcije	Razdijeliti taljevinu	Uljevna šupljina kalupa
	Oblikovati taljevinu	Kalupna šupljina
	Održavati temperaturno polje u kalupu	Sustav za temperiranje
	Odzračiti kalupnu šupljinu	Sustav za odzračivanje
	Izvaditi grozd iz kalupne šupljine	Sustav za vađenje grozda
Pomoćne parcijalne funkcije	Voditi i centrirati dijelove kalupa	Sustav za vođenje i centriranje
	Pričvrstiti kalup na ubrizgavalicu	Elementi za pričvršćivanje kalupa na ubrizgavalicu
	Prihvatiti i prenijeti sile	Elementi za prihvat i prijenos sila
	Povezati elemente kalupa	Kućište kalupa
	Posebne funkcije	Posebni elementi

Radi olakšane preglednosti parcijalnih funkcija i elemenata koji moraju izvršiti određenu parcijalnu funkciju, slika 5.2 prikazuje jednostavniji kalup sa ucrtanim parcijalnim funkcijama pojedinih njegovih elemenata.



Slika 5.2: Parcijalne funkcije kalupa za injekcijsko prešanje [11]

Međusobni utjecaji između pojedinih parcijalnih funkcija koje utječu na mogućnost njihova ostvarenja prikazani su u tablici 5.2. Svaka parcijalna funkcija dovedena je u vezu s drugim parcijalnim funkcijama, te su analizirani njihovi utjecaji na njeno izvršenje. Utjecaj djelovanja pojedine funkcije može biti takav da ne utječe, utječe ili značajno utječe na ispunjenje promatrane parcijalne funkcije. Kod posebnih funkcija nije moguće odgovoriti na pitanje o međusobnom utjecaju, jer to ovisi o konkretnoj varijanti rješenja posebne funkcije.

Tablica 5.2: Međusobni utjecaji parcijalnih funkcija kalupa [11]

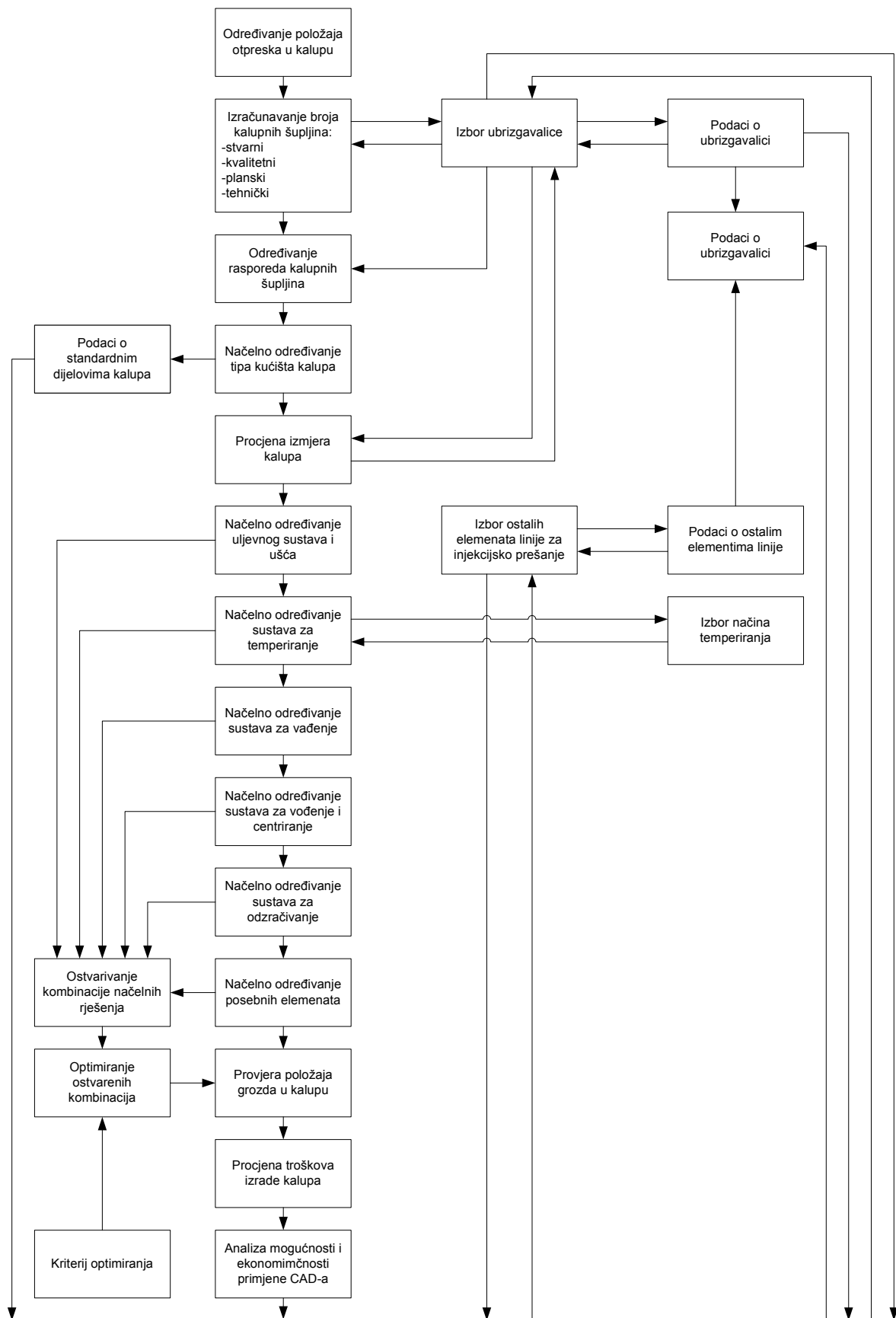
Parcijalna funkcija kalupa		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
C ₁	Razdijeliti plastomernu taljevinu		++	+			+	+	+	+	?
C ₂	Praoblikovati i strukturirati taljevinu			++	++		+	+	+	+	?
C ₃	Održavati temperaturno polje u kalupu					+	+			+	?
C ₄	Odzračiti kalupnu šupljinu			+			++				?
C ₅	Izvaditi grozd iz kalupne šupljine	++		++			++	+	+	+	?
C ₆	Centrirati i voditi dijelove kalupa				++	++		++	++	++	?
C ₇	Pričvrstiti kalup na ubrizgavalicu						++		++	++	?
C ₈	Prihvatiti i prenijeti sile				+	++	++	++		++	?
C ₉	Povezati elemente kalupa					+	++	++	++		?
C ₁₀	Posebne funkcije	?	?	?	?	?	?	?	?	?	

Značenje simbola: + utjecaj, ++ značajni utjecaj,

? utjecaj ovisan o izvedbi rješenja parcijalne funkcije

5.3. Konceptijsko oblikovanje kalupa [10]

Razrada koncepcije kalupa, prva je i najvažnija faza u procesu konstruiranja kalupa. U njoj se načelno određuju svi njegovi elementi, koji izravno utječu na pouzdano funkcioniranje kalupa. Odluke koje se donese tijekom ove faze su odluke visokorazinskog odlučivanja. O kvaliteti koncepcije kalupa i načelnog određivanja njegovih elemenata ovisi pouzdano funkcioniranje kalupa tijekom njegove eksploatacije (slika 5.3).



Slika 5.3: Razrada faze koncipiranja kalupa za injekcijsko prešanje [10]

5.3.1. Načelno određivanje tipa kućišta kalupa

Položaj otpreska u kalupu, njegov oblik i izmjere, te broj i raspored kalupnih šupljina izravno određuju vrstu kućišta kalupa. Iako je izbor vrste kućišta kalupa uglavnom prepušten iskustvu i intuiciji konstruktora kalupa, na temelju geometrije otpresaka, broja i rasporeda kalupnih šupljina moguće je djelomice formalizirati izbor kućišta kalupa. U tu svrhu razrađen je dijagram odlučivanja za načelno određivanje tipa kućišta kalupa (slika 5.4).

Pri konačnom izboru vrste kućišta kalupa potrebno je također raspolagati podacima o standardnim elementima kućišta kalupa. Standardne elemente kućišta kalupa treba rabiti svugdje, gdje to konstrukcija otpreska i kalupa dopušta. U tom slučaju nema potrebe za izradbom tih elemenata u alatnici.

5.3.2. Načelno određivanje rasporeda kalupnih šupljina

Pri određivanju rasporeda kalupnih šupljina uglavnom se teži za rasporedom koji će najbolje iskoristiti obujam kalupa, te da putevi tečenja budu što kraći i isti do svih kalupnih šupljina. Za određivanje položaja otpreska u kalupu načinjen je dijagram odluka (slika 5.5) na temelju čega se ubrzava određivanje položaja otpreska u kalupu.

5.3.3. Načelno određivanje uljevnog sustava i ušća

Na temelju analiziranih vrsta uljevnih sustava i ušća, te njihovog opisa načinjen je dijagram odlučivanja za načelno određivanje vrste uljevnog sustava i ušća. U prvom redu potrebno je definirati radi li se o čvrstom ili vrućem uljevnom sustavu, odnosno njihovoj kombinaciji, a zatim se odabiru odgovarajuća rješenja unutar definiranog uljevnog sustava (slika 5.6).

5.3.4. Načelno određivanje sustava za temperiranje

Ova aktivnost obuhvaća izbor sustava za temperiranje kalupa. Ukoliko se radi o temperiranju kalupa s pomoću medija za temperiranje (predtlačno i podtlačno) razrađen je dijagram odlučivanja za načelno određivanje elemenata takvog sustava (slika 5.7).

5.3.5. Načelno određivanje sustava za vađenje otpreska iz kalupa

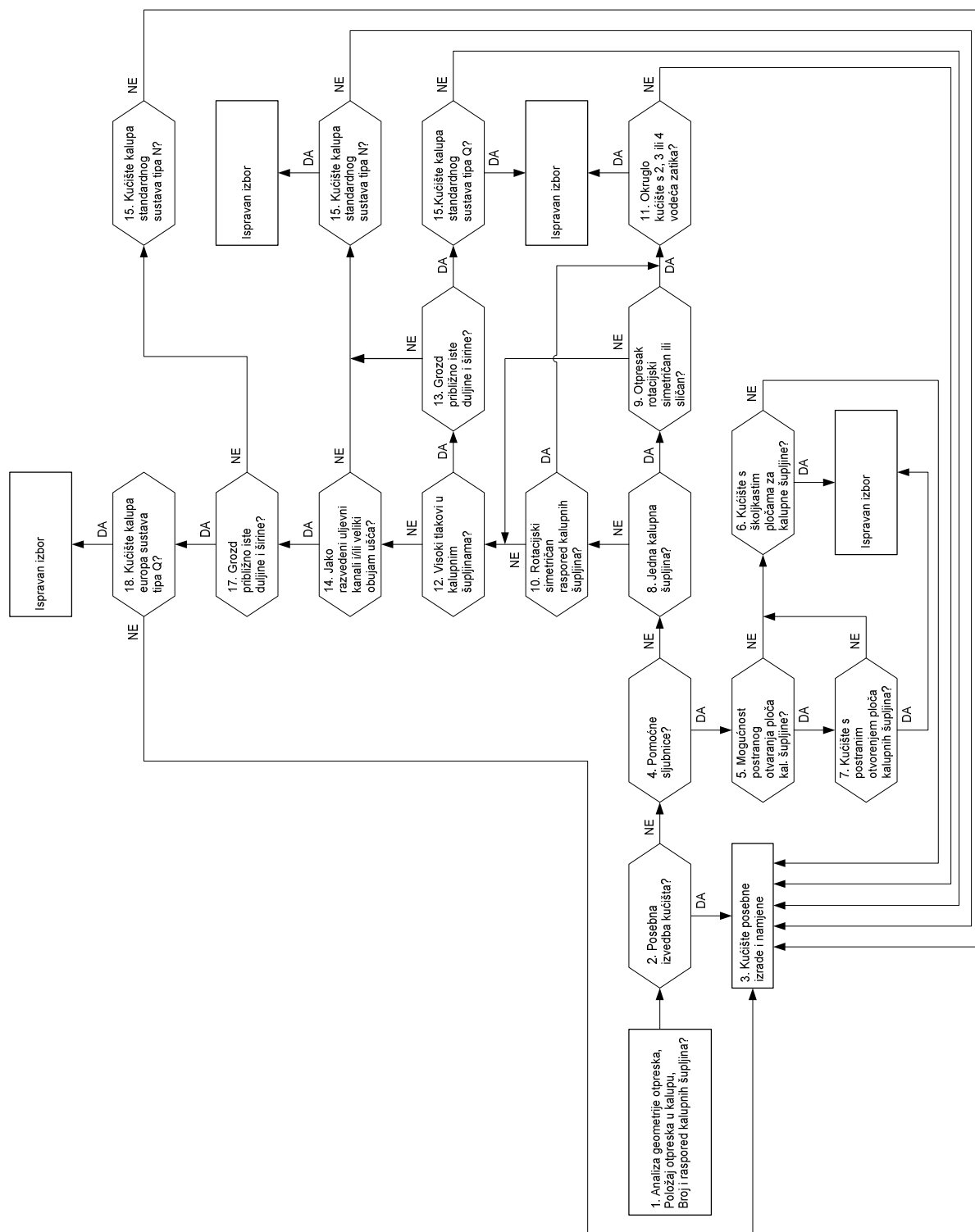
Tijekom ove aktivnosti određuju se potrebni elementi sustava za vađenje otpresaka iz kalupa. Pri određivanju moguće je koristiti dijagram za načelno određivanje sustava za vađenje otpreska (slika 5.8).

5.3.6. Načelno određivanje sustava za vođenje i centriranje

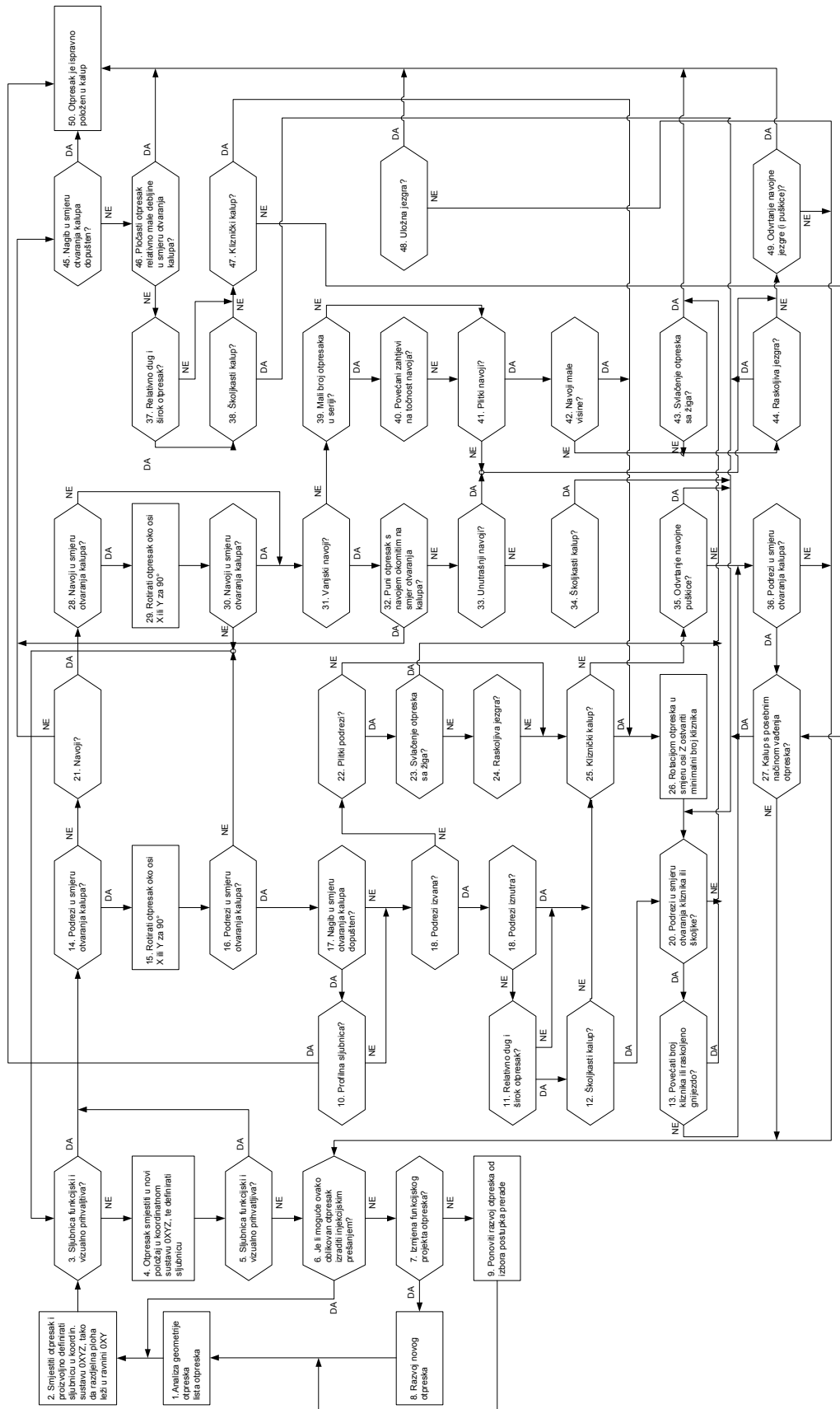
Na temelju analize i opisa poznatih načina vođenja i centriranja kalupa sačinjen je dijagram odlika za načelno određivanje sustava za vođenje i centriranje (slika 5.9). Pri tome valja definirati elemente za vanjsko centriranje kalupa i unutrašnje centriranje kalupa, te vođenje elemenata kalupa kako bi se osiguralo točno nalijeganje pomičnog i nepomičnog dijela kalupa.

5.3.7. Načelno određivanje sustava za odzračivanje kalupne šupljine

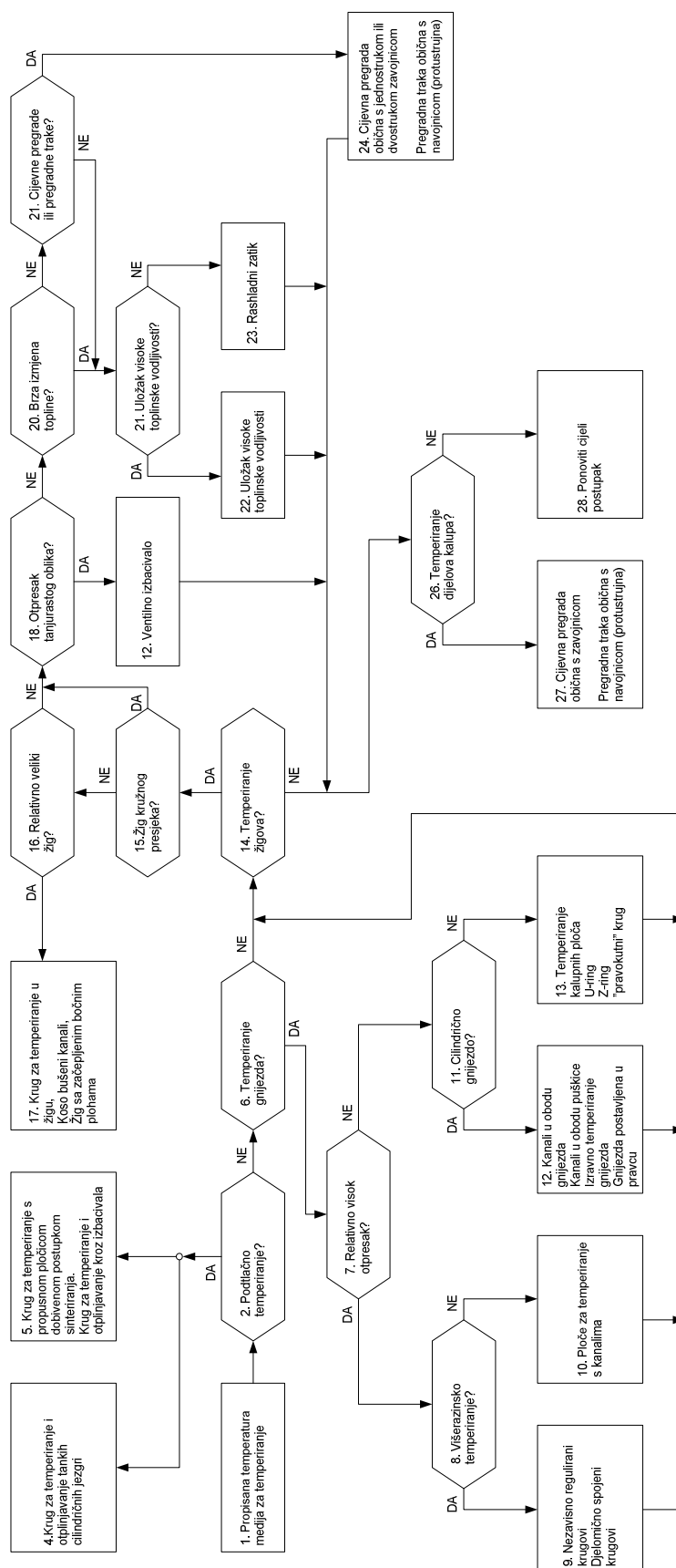
Odzračivanje kalupne šupljine važna je funkcija kalupa, kako prilikom ubrizgavanja polimerne taljevine u kalupnu šupljinu u njoj ne bi zaostao zrak koji bi onemogućio popunjavanje kalupne šupljine. Stoga je na temelju analiza elemenata sustava za odzračivanje načinjen dijagram odlučivanja za načelno određivanje sustava za odzračivanje kalupne šupljine (slika 5.10).



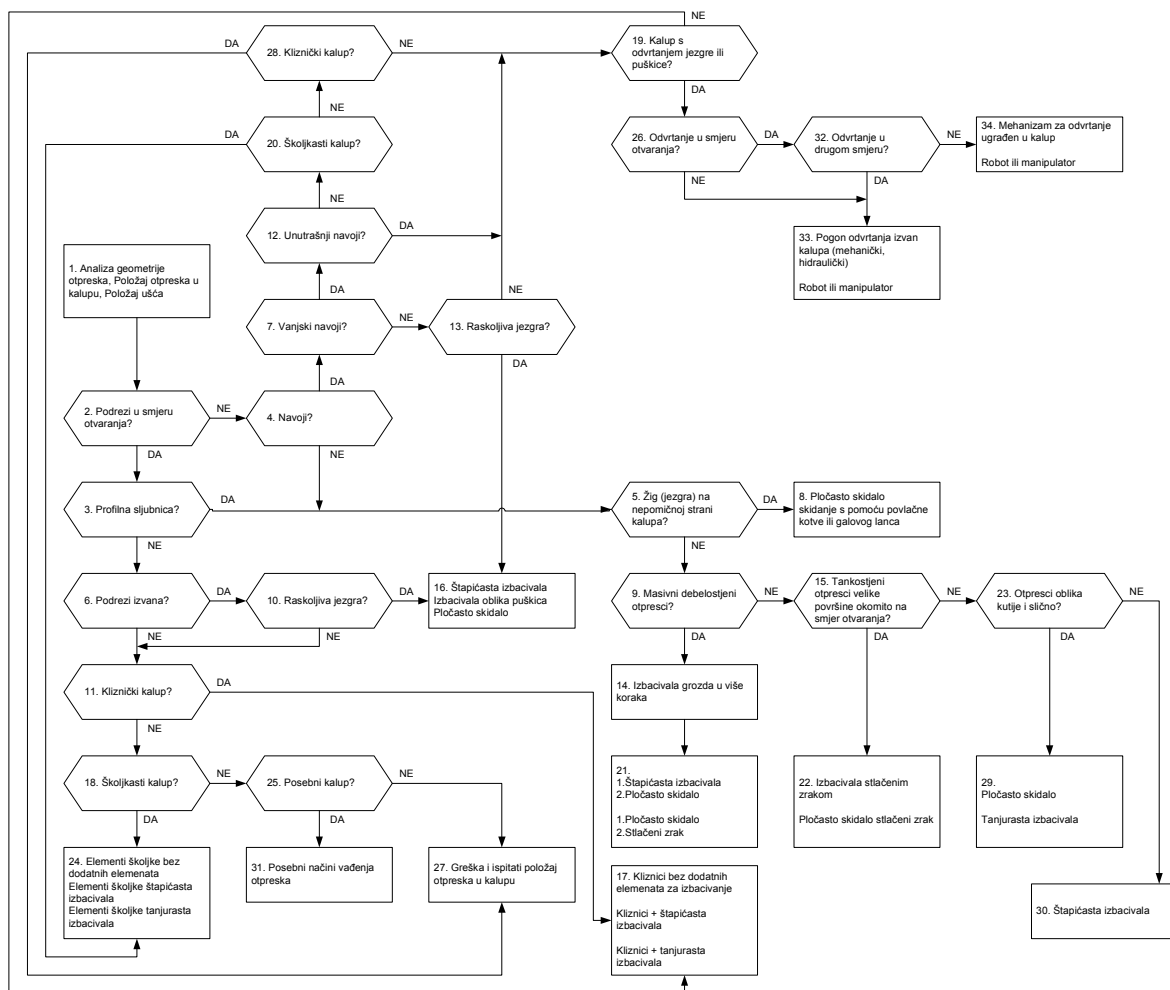
Slika 5.4: Dijagram načelnog određivanja tipa kućišta kalupa [12]



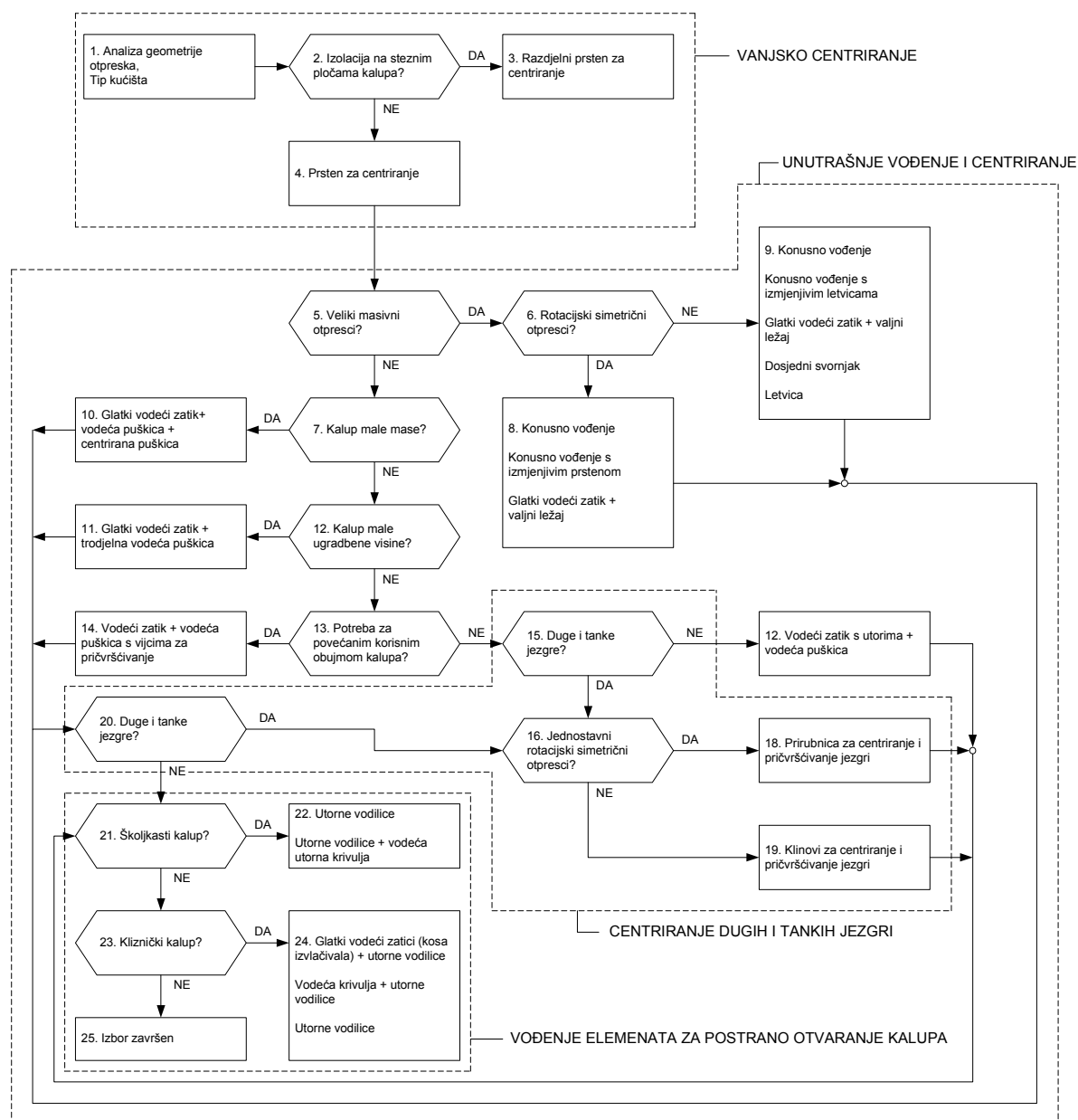
Slika 5.5: Dijagram za načelno određivanje položaja otpreska u kalupu [12]



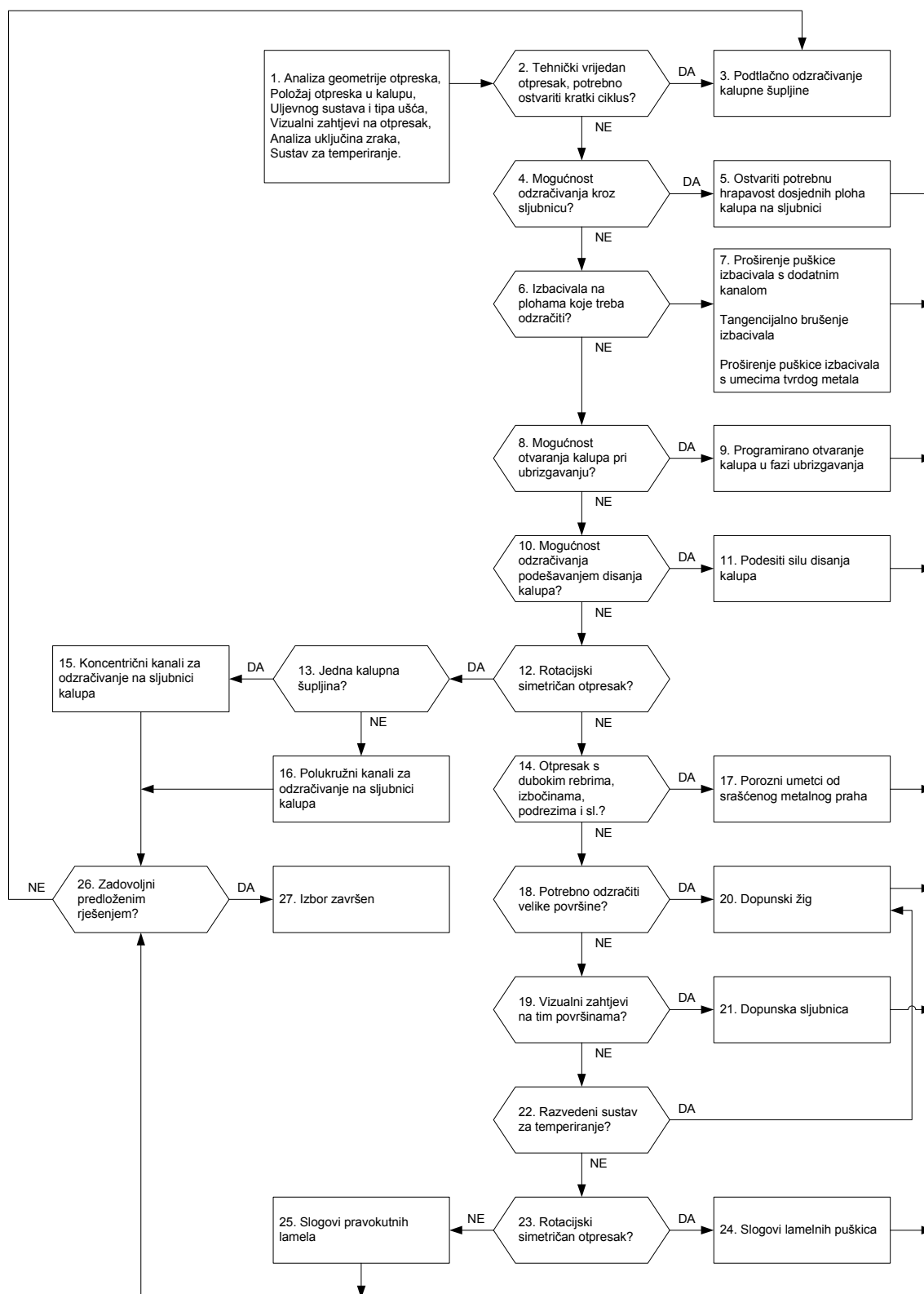
Slika 5.7: Dijagram za načelno određivanje sustava za temperiranje [12]



Slika 5.8: Dijagram za načelno određivanje sustava za vađenje grozda iz kalupa [12]



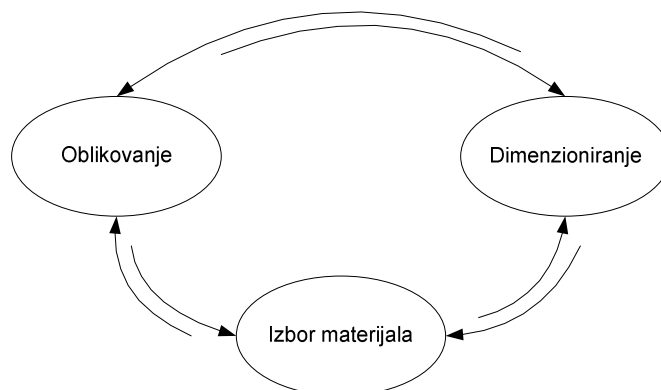
Slika 5.9: Dijagram za načelno određivanje sustava za vođenje i centriranje [12]



Slika 5.10: Dijagram za načelno određivanje sustava za odzračivanje kalupa [12]

5.4. Dimenzioniranje elemenata kalupa

Središnja faza razvoja kalupa za injekcijsko prešanje je njegovo dimenzioniranje. Ovu fazu, koja se često naziva i projektnom fazom, karakterizira visoka uzajamna povezanost triju glavnih aktivnosti: oblikovanja, dimenzioniranja i izbora materijala (slika 5.11).



Slika 5.11: Glavne aktivnosti središnje faze konstruiranja [12]

Tijekom faze proračuna i dimenzioniranja elemenata kalupa potrebno je načiniti reološki, toplinski i mehanički proračun kalupa.

Prije samog početka proračuna (dimenzioniranja) kalupa potrebno je raspolagati odgovarajućim podacima koji predstavljaju ulaznu skupinu podataka, tzv. *lista otpreska*, koja sadrži sve podatke o vrsti polimernog materijala i obliku otpreska. [10]

5.4.1. Reološki proračun kalupa

Reološki proračun predstavlja prvu fazu dimenzioniranja elemenata kalupa. Sastoji se od određivanja tlaka u kalupnoj šupljini, te padovima tlaka u uljevnom sustavu, kako bi se osiguralo ispravno popunjavanje kalupne šupljine. Uz proračune tlakova potrebno je odrediti i potrebnu silu držanja kalupa, te viskoznost plastomernog materijala. [10]

5.4.1.1. Određivanje potrebnog tlaka u kalupnoj šupljini

Tlak u kalupnoj šupljini aktivno je opterećenje koje djeluje na stijenke kalupne šupljine i ostale elemente kalupa. Za proračun je potrebno poznavati svojstva polimernog materijala (toplinska i reološka). [1]

Za određivanja tlaka u kalupnoj šupljini, najčešće se koristi $p-v-T$ dijagram plastomernog materijala. Plastomerna taljevina temperature T_T dolazi u kalupnu šupljinu pod tlakom p_r i hladi se do pretpostavljene temperature otvaranja kalupa T_{OK} . Nakon otvaranja kalupa, tlak plastomernog otpreska jednak je okolišnom tlaku (uzima se $p_0 = 0,1$ MPa), pa je moguće iz

$p-v-T$ dijagrama očitati i specifični obujam plastomernog materijala. Prije početka otvaranja kalupa, plastomerna taljevina treba u kalupu postići temperaturu postojanosti oblika T_{Po} pri kojoj se otpresak može sigurno izvaditi iz kalupne šupljine. Kako se pretpostavlja da je vrijednost specifičnog obujma plastomera tijekom ciklusa injekcijskog prešanja konstantna, moguće je odrediti tlak pri kojem treba biti plastomerna taljevina u trenutku postizanja T_{Po} . To je ujedno i vrijednost potrebnog tlaka u kalupnoj šupljini p_K . [13]

5.4.1.2. Dimenzioniranje uljevnog sustava [10]

U ovom koraku reološkog proračuna potrebno je odrediti izmjere segmenata uljevnog sustav: uljevka, uljevnih i razdjelnih kanala, te ušća. Uz izmjere segmenata, potrebno je još odrediti i padove pritiska u pojedinom segmentu uljevnog sustava, kako bi se mogao odrediti potreban tlak ubrizgavanja (značajka ubrizgavalice).

Proračunu se pristupa određivanjem dimenzija segmenata uljevnog sustava. Općenito, promjer uljevnog kanala ne smije biti manji od trostruke vrijednosti najdeblje stijenke otpreska. Uljevni kanali ne smiju biti premali, kako se ulazeća taljevina ne bi ohladila, ili kako ne bi započeo proces polimeriziranja prije nego taljevina dođe do ušća. S ciljem smanjenja pritiska u uljevnom sustavu, uljevni kanali se izrađuju bez promjene smjera tečenja, a ako je potrebno promijeniti smjer tečenja, u kanalima se rade zakrivljenja s polumjerom.

$$d_{uk} = \frac{\sqrt{m_o} \cdot \sqrt[4]{l_{uk}}}{21} \quad (5.1)$$

gdje su: d_{uk} – promjer uljevnog kanala (mm), m_o – masa otpreska (g), l_{uk} – duljina uljevnog kanala (mm).

Potrebnu veličinu elemenata uljevnog sustava moguće je odrediti na više načina: iskustveno, simulacijom i proračunom.

Pri određivanju dimenzija ušća posebnu pozornost potrebno je posvetiti smičnoj brzini taljevine. Visoka smična brzina može povisiti mjesnu brzinu taljevine, čime se snižava viskoznost pa taljevina lakše popunjava kalupnu šupljinu.

5.4.1.3. Proračun pada pritiska u uljevnom sustavu [10]

Nakon određivanja dimenzija segmenata uljevnog sustava potrebno je odrediti padove tlaka u svakom segmentu zasebno. Za proračun pada tlaka uglavnom se koriste Hagen-Poiseullova ili grafo-analitička metoda. Obje metode prilagođene su proračunima kružnih i pravokutnih segmenata uljevnog sustava.

PRORAČUN PADA TLAKA PREMA HAGEN-POISEULLOVOJ METODI

Pad tlaka Δp_{us} (u segmentu uljevnog sustava kružnog oblika):

$$\Delta p_{us} = \frac{128 \cdot \eta \cdot l \cdot q_v}{\pi \cdot d^4} \quad (5.2)$$

gdje su: η – smična viskoznost plastomerne taljevine (Pas), l – duljina segmenta uljevnog sustava (m), q_v – obujamni protok taljevine (m³/s), d – promjer segmenta uljevnog sustava (m).

Obujamni protok plastomerne taljevine q_v (m³/s):

$$q_v = \frac{V_u}{t_u} \quad (5.3)$$

gdje su: V_u – obujam ubrizgavanja (m³), t_u – vrijeme ubrizgavanja (s).

Smična brzina plastomerne taljevine $\dot{\gamma}$:

$$\dot{\gamma} = \frac{32 \cdot q_v}{\pi \cdot d^3} \quad (5.4)$$

gdje je: q_v – obujamni protok taljevine (m³/s)

Smična viskoznost η :

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^m \quad (5.5)$$

gdje su: K – konstanta materijala, $\dot{\gamma}$ – smična brzina taljevine (s⁻¹), m – eksponent tečenja.

Konstanta materijala K :

$$K = K_{OT} \cdot e^{-\beta \cdot T_r} \quad (5.6)$$

gdje su: K_{OT} – konstanta materijala (kg/m · s^{1-m}), β – temperaturni koeficijent.

Promjena temperature ΔT_u :

$$\Delta T_u = \frac{\Delta p_u}{\rho \cdot c_p} \quad (5.7)$$

gdje su: Δp_{us} – pad pritiska (Pa), ρ – gustoća plastomerne taljevine (g/cm³), c_p – specifični toplinski kapacitet plastomerne taljevine (J/kgK).

Pad tlaka Δp_{us} (u segmentu uljevnog sustava pravokutnog presjeka):

$$\Delta p_{us} = \frac{32 \cdot \varphi \cdot \bar{v} \cdot \eta \cdot l}{D_h^4} \quad (5.8)$$

gdje su: φ - koeficijent oblika, \bar{v} - srednja brzina čela taljevine (m/s), l - duljina segmenta uljevnog sustava (m), D_h - hidraulički promjer (m).

Koeficijent oblika φ :

$$\varphi = \frac{56,9 + 3,91 \cdot \left(1 - \frac{h}{b}\right)^3}{64} \quad (5.9)$$

gdje su: b - širina kanala (m), h - visina kanala (m).

Obujamni protok plastomerne taljevine q_v (isto kao (5.3))

Srednja brzina čela taljevine \bar{v} :

$$\bar{v} = \frac{q_v}{b \cdot h} \quad (5.10)$$

Konstanta materijala K (isto kao (5.6))

Smična brzina plastomerne taljevine $\dot{\gamma}$ (isto kao (5.4))

Smična viskoznost η (isto kao (5.5))

Hidraulički promjer D_h :

$$D_h = \frac{2 \cdot b \cdot h}{b + h} \quad (5.11)$$

Nakon proračuna pada tlaka u segmentima, moguće je odrediti ukupan pad pritiska u uljevnom sustavu kalupa, koji se kasnije upotrebljava u odabiru ubrizgavalice i proračunu tlaka ubrizgavanja.

PRORAČUN PADA TLAKA GRAFO-ANALITIČKOM METODOM

Pad tlaka Δp_{us} (u segmentu uljevnog sustava kružnog oblika):

$$\Delta p_{us} = \left(\frac{q_v \cdot m}{\dot{\gamma}} \right)^{1/m} \quad (5.12)$$

Obujamni protok plastomerne taljevine q_v (isto kao (5.3))

Prividna smična brzina plastomerne taljevine $\dot{\gamma}_s$:

$$\dot{\gamma}_s = \frac{32 \cdot q_v}{\pi \cdot d^3} \quad (5.13)$$

Smična brzina plastomerne taljevine $\dot{\gamma}_1$ i $\dot{\gamma}_2$:

$$\dot{\gamma}_1 = 0,5 \cdot \dot{\gamma}_s \quad (5.14)$$

$$\dot{\gamma}_2 = 2 \cdot \dot{\gamma}_s \quad (5.15)$$

Smično naprezanje τ_1 i τ_2 :

Smično naprezanje je funkcija smične brzine, te se očitava iz dijagrama *smično naprezanje – smična brzina*. Funkcionalna ovisnost smične brzine i smičnog naprezanja ovisi o materijalu. Dijagrami se dobivaju od proizvođača materijala.

EkspONENT tečenja m :

$$m = \frac{\log \dot{\gamma}_2 - \log \dot{\gamma}_1}{\log \tau_2 - \log \tau_1} \quad (5.16)$$

gdje su: τ_1 i τ_2 – smično naprezanje (N/m²).

Smična brzina $\dot{\gamma}$:

$$\dot{\gamma} = \frac{8 \cdot (m+3) \cdot \bar{v}}{d^3} \quad (5.17)$$

Promjena temperature ΔT_u (isto kao (5.7))

Pad tlaka Δp_{us} (u segmentu uljevnog sustava kružnog oblika):

$$\Delta p_{us} = \left(\frac{q_v \cdot m}{\dot{\gamma}} \right)^{1/m} \quad (5.18)$$

Obujamni protok plastomerne taljevine q_v (isto kao (5.3))

EkspONENT tečenja m (isto kao (5.16))

Prividna smična brzina plastomerne taljevine $\dot{\gamma}_s$:

$$\dot{\gamma}_s = \frac{6 \cdot q_v}{b \cdot h} \quad (5.19)$$

Smična brzina plastomerne taljevine $\dot{\gamma}_1$ i $\dot{\gamma}_2$ (isto kao (5.14) i (5.15))

Srednja brzina čela taljevine \bar{v} (isto kao (5.10))

Hidraulički promjer D_h (isto kao (5.11))

Otpor tečenju w_k :

$$w_k = \frac{2^{2 \cdot m + 3} \cdot (m + 3) \cdot l^m}{D_h^{m+3} \cdot \pi} \quad (5.20)$$

Promjena temperature ΔT_u (isto kao (5.7))

5.4.1.4. Proračun pada pritiska u mlaznici ubrizgavalice [10]

Izabrana ubrizgavalica treba moći ostvariti potreban pritisak u kalupnoj šupljini te „pokriti“ padove pritiska u segmentima uljevnog sustava. Pored toga, određeni pad pritiska u plastomernoj taljevini ostvaruje se i njenim prolaskom kroz mlaznicu ubrizgavalice. Stoga je nužno proračunati taj pad pritiska, pribrojati ga padovima pritiska u uljevnom sustavu i potrebnom pritisku u kalupnoj šupljini, te provjeriti može li izabrana ubrizgavalica ostvariti potreban pritisak ubrizgavanja.

Proračun pada pritiska u mlaznici ubrizgavalice identičan je proračunu pada pritiska u uljevnom sustavu.

Pad pritiska u mlaznici ubrizgavalice Δp_n :

$$\Delta p_n = \frac{128 \cdot \eta \cdot l_n \cdot q_v}{\pi \cdot d_n^4} \quad (5.21)$$

gdje je: d_n - promjer mlaznice (m).

Minimalni potrebni pritisak ubrizgavanja plastomerne taljevine Δp_{umin} :

$$\Delta p_{\text{umin}} = \sum \Delta p_{\text{us}} + \Delta p_n + p_k \quad (5.22)$$

gdje su: Δp_{us} - ukupan pad pritiska kroz uljevni sustav i kalupnu šupljinu (Pa), Δp_n - pad pritiska u mlaznici ubrizgavalice (Pa), p_k - tlak u kalupnoj šupljini (Pa).

5.4.1.5. Proračun sile držanja kalupa [10]

Sila držanja kalupa javlja se kao reakcija djelovanja tlaka u kalupnoj šupljini u smjeru otvaranja kalupa. To je ujedno i zadnji korak u reološkom proračunu, te je od velikog značaja za provjeru izbora ubrizgavalice. Pomoću poznatog oblika otpreska, dimenzija uljevnog sustava i potrebnog tlaka u kalupnoj šupljini moguće je odrediti potrebnu silu držanja.

Sila držanja F_d (za otpresak velike tlocrtne površine):

$$F_d = p_k \cdot (S_{ot} + S_{us}) \cdot k \quad (5.23)$$

gdje su: p_k - tlak u kalupnoj šupljini (Pa), S_{ot} - ploština otpres(a)ka (m²), S_{us} - ploština uljevnog sustava (m²).

Sila držanja F_d (za prešanje tankostijenih posuda):

$$F_d = \frac{k \cdot p_k \cdot d_t^2 \cdot \pi}{4} \quad (5.24)$$

gdje su: k - faktor sigurnosti (1,1 do 1,2), d_t - vanjski promjer kružnog skidala (m).

Sila držanja F_d (za prešanje kružnih otpresaka):

$$F_d = \frac{d}{d_m} \cdot l \cdot p_k \cdot \chi_k \quad (5.25)$$

gdje su: d - najveći vanjski promjer otpreska (m), d_m - srednji promjer vodeće plohe (m), l - unutarnja visina otpreska (m), χ_k - neimenovani broj, a računa se iz jednadžbe:

$$\chi_k = 2 \cdot l_1 / l \quad (5.26)$$

gdje su: l_1 - udaljenost hvatišta sile F_u od srednjeg promjera vodeće plohe (m), l - unutarnja visina otpreska (m).

Sila držanja F_d (za izradbu otpresaka u školjkastom kalupu):

$$F_d = k \cdot a \cdot F_u \quad (5.27)$$

gdje su: a - koeficijent ovisan o kutu poluškoljke, F_u - sila ubrizgavanja (N).

Koeficijent ovisan o kutu poluškoljke a :

$$a = 2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \rho) \quad (5.28)$$

gdje su: α - kut poluškoljke, ρ - kut trenja.

5.4.2. Toplinski proračun kalupa

5.4.2.1. Analiza ciklusa injekcijskog prešanja [10]

Vrijeme potrebno za izradbu jednog grozda t_c sastoji se od vremena hlađenja otpreska t_h i ostalih vremena potrebnih za uspješan tok ciklusa koji sačinjavaju pomoćno vrijeme t_p .

$$t_c = t_h + t_p \quad (5.29)$$

5.4.2.2. Opća jednačba hlađenja plastomernih otpresaka

Na temelju brojnih radova, došlo se do zaključka da se vrijeme hlađenja može izračunati pomoću formule:

$$t_h = \frac{b_o^2}{K_o \cdot \pi^2 \cdot a_{ef}} \ln \left(K_{U1} \frac{T_T - T_K}{T_U - T_K} \right) \quad (5.30)$$

gdje su: b_o – karakteristična izmjera otpreska (m), K_o – koeficijent oblika, T_T – temperatura taljevine (K), T_U – temperatura unutrašnjosti (temperatura koju poprima središte otpreska, a koje se u pravilu zamjenjuje s temperaturom postojanosti oblika T_{Po}) (K), K_U – koeficijent unutrašnjosti, a_{ef} – efektivna toplinska difuzivnost (m^2/s).

Efektivna toplinska difuzivnost izračunavaju se pomoću jednačbe:

$$a_{ef} = a_1 T_K + b_1 \quad (5.31)$$

gdje su: a_1 , b_1 – koeficijenti jednačbe pravca (m^2/sK)

Tablica 5.3: Koeficijenti jednačbe pravca za $a_{ef}=f(T_K)$ [13]

Plastomer	Koeficijent a_1 ($10^{-8}m^2/sK$)	Koeficijent b_1 ($10^{-8}m^2/sK$)
ABS	0,0042	6,9052
LDPE	-0,0417	21,4513
HDPE	-0,0634	28,0252
PA 6,6	-0,0050	10,3650
PC	0,0045	9,3789
PMMA	-0,0160	12,5102
POM	-0,0382	19,1988
PP	-0,0106	9,8494
PS	-0,0193	14,3579
PVC	0,0066	5,1172
SAN	-0,0015	9,0069

Tablica 5.4: Koeficijenti oblika i unutrašnjosti za otpreske različitih oblika [13]

Vrsta otpreska i izmjere	Rubni uvjeti	Koeficijent oblika K_o		Koeficijent unutrašnjosti K_u	
		a_{10}	a_{20}	\hat{t}_h	\bar{t}_h
Ploča $b_o = s_o$	$\Phi_z = 0$ $\Phi_x = 0$	0	0	$4/\pi$	$8/\pi^2$
Valjak (beskonačne duljine) $b_o = d_o, l_o = \infty$	$\Phi_z = 0$ $\Phi_\varphi = 0$	0	1,15965	1,599	0,975
Valjak (konačne duljine) $b_o = d_o, l_o$	$\Phi_\varphi = 0$	1,15956	d_o/l_o	$6,396/\pi$	$7,802/\pi^2$
Kugla $b_o = d_o$		1	$\sqrt{2}$	2	1,178
Kvadar (beskonačne duljine) $b_o, h_o, l_o = \infty$	$\Phi_z = 0$	b_o/h_o	0	$16/\pi^2$	$64/\pi^4$
Kvadar (konačne duljine) b_o, h_o, l_o		b_o/h_o	b_o/h_o	$64/\pi^3$	$64/\pi^6$
Kocka $b_o = h_o$		1	1	$64/\pi^3$	$512/\pi^6$
Šuplji valjak (bez unutarnjeg hlađenja) $b_o = d_v - d_u$	$\Phi_z = 0$ $\Phi_\varphi = 0$ $\Phi_r = 0$	0	0	$4/\pi$	$8/\pi^2$
Šuplji valjak (s obostranim hlađenjem) $b_o = (d_v - d_u)/2$	$\Phi_z = 0$ $\Phi_\varphi = 0$	0	0	$4/\pi$	$8/\pi^2$

Dopunsko vrijeme hlađenja t_d :

$$t_d = t_h - (t_u + t_{np} + t_{ps} + t_{mr}) \quad (5.32)$$

Vrijeme ubrizgavanja taljevine t_u :

Određuje se na temelju iskustva ili na temelju rezultata računalne simulacije.

Vrijeme naknadnog pritiska t_{np} :

Svodi se na određivanje vremena hlađenja presjeka ušća. Za proračun tog vremena vrijediti će iste zakonitosti, kao za određivanje vremena hlađenja otpreska, samo što ušće može biti drugačijeg oblika i dimenzija.

Vrijeme plastificiranja t_{ps} :

$$t_{ps} = m_g / q_p \quad (5.33)$$

gdje su: m_g - masa grozda, q_p - masa plastomera koju ubrizgavalica može plastificirati u jedinici vremena.

Vrijeme potrebno za vraćanje mlaznice u početni položaj t_{mr} :

To vrijeme je značajka ubrizgavalice.

5.4.2.3. Pomoćno vrijeme ciklusa [13]

Na početku proračuna potrebno je odrediti pomoćna vremena ciklusa injekcijskog prešanja, koja su funkcija kalupa i ubrizgavalice.

$$t_p = t_m + t_{kl} + t_z + t_s + t_{mp} + t_o + t_{iz} \quad (5.34)$$

gdje su: t_m - vrijeme podmazivanja i čišćenja kalupa, t_{kl} - vrijeme posluživanja otvorenog kalupa, t_z - vrijeme zatvaranja kalupa, t_s - vrijeme ukapčanja, t_{mp} - vrijeme približavanja mlaznice, t_o - vrijeme otvaranja kalupa, t_{iz} - vrijeme izbacivanja grozda.

Vrijeme podmazivanja i čišćenja kalupa t_m :

To je vrijeme potrebno poslužitelju ubrizgavalice za čišćenje i podmazivanje kalupa. Kalup se može podmazivati i posebnim uređajima.

$$t_m = t_c + x_{ks} \cdot t_{ml} \quad (5.35)$$

gdje su: t_c - vrijeme čišćenja kalupa od srha i slično, x_{ks} - broj kalupnih šupljina, t_{ml} - vrijeme podmazivanja jedne kalupne šupljine.

Vrijeme posluživanja otvorenog kalupa t_{k1} :

To je vrijeme kojeg zahtijevaju neke konstrukcije kalupa da se npr. Jezgre umetnu u kalup ručno. Slično je kad se predviđa ulaganje umetka ili se hvataljkama kalupu oduzima grozd.

$$t_{k1} = a_{k1} + x_{ks} \cdot b_{k1} \quad (5.36)$$

gdje su: a_{k1} - vrijeme posluživanja otvorenog kalupa neovisno o broju kalupnih šupljina, b_{k1} - vrijeme posluživanja otvorenog kalupa ovisno o broju kalupnih šupljina.

Vrijeme zatvaranja kalupa t_z :

Sastoji se od vremena zatvaranja kalupa i vremena posluživanja zatvorenog kalupa.

$$t_z = t_{zs} + t_{k2} \quad (5.37)$$

gdje su: t_{zs} - strojno vrijeme zatvaranja kalupa, t_{k2} - vrijeme posluživanja zatvorenog kalupa.

Vrijeme ukapčanja t_s i približavanja mlaznice t_{mp} :

Javlja se kod ubrizgavalice u slučajevima kada plastomer još nije zagrijan. Vrijeme približavanja mlaznice je vrijeme potrebno da se mlaznica primakne uljevnom tuljcu.

Vrijeme otvaranja kalupa t_o

$$t_o = t_{k3} + t_{os} \quad (5.38)$$

gdje su: t_{k3} - vrijeme posluživanja kalupa u trenutku koji prethodi njegovu otvaranju, t_{os} - strojno vrijeme otvaranja.

Vrijeme izbacivanja grozda t_{iz} :

$$t_{iz} = t_{k4} + t_{id} \quad (5.39)$$

gdje su: t_{k4} - vrijeme posluživanja kalupa pri izbacivanju otpreska, t_{id} - dopunsko vrijeme izbacivanja otpreska.

5.4.2.4. Proračun temperature podešavanja kalupne šupljine

U praksi je najčešći slučaj da se zbog gospodarskih ili kvalitativnih razloga odredi potrebna temperatura stijenke kalupne šupljine. Kako je T_K računska veličina, određuje se temperatura koju je moguće podešavati, a to je temperatura podešavanja kalupne šupljine T_p .

Početna temperatura stijenke kalupne šupljine T_p :

$$T_p = \frac{T_K \cdot (b_K + b_p) - (1 - A) \cdot T_T \cdot b_p}{b_K + b_p \cdot A} \quad (5.40)$$

gdje su: b_K - toplinska prodornost materijala kalupne šupljine ($Ws^{1/2}m^{-2}K^{-1}$), b_p - toplinska prodornost plastomera ($Ws^{1/2}m^{-2}K^{-1}$), A - bezdimenzionalna značajka.

Temperatura stijenke kalupne šupljine T_K :

$$T_K = (T_D + T_p) / 2 \quad (5.41)$$

gdje je: T_D - dodirna temperatura (K).

Dodirna temperatura T_D :

$$T_D = \frac{T_p \cdot b_K + T_T \cdot b_p}{b_K + b_p} \quad (5.42)$$

Temperatura otvaranja kalupa T_{OK} :

$$T_{OK} = 2 \cdot T_K - T_p \quad (5.43)$$

Bezdimenzionalna značajka A :

$$A = \frac{t_h}{2 \cdot t_c} \quad (5.44)$$

gdje su: t_h - vrijeme hlađenja otpreska (s), t_c - vrijeme trajanja ciklusa (s).

5.4.2.5. Temperatura i toplinska svojstva medija za temperiranje [10]

U okviru proračuna medija za temperiranje potrebno je odrediti svojstva medija: gustoću, kinematičku viskoznost, toplinsku provodnost, specifični toplinski kapacitet i Prandtlovu značajku. Ako je temperatura medija za temperiranje niža od 278 K (5°C) ili viša od 368 K (95°C) najčešće se vodi kao mediju za temperiranje dodaje i sredstvo za sprečavanje zamrzavanja ili isparavanja. Ukoliko se vodi dodaje takvo sredstvo potrebno je proračunati toplinska svojstva mješavine.

5.4.2.6. Proračun toplinske bilance kalupa [10]

Toplina izmijenjena s okolinom sastoji se od topline koju izmjeni kalup zračenjem i konvekcijom preko stranica i sljubnica, te provođenjem s nosačima kalupa ubrizgavalice. Ako kalup radi pri niskim temperaturama, a želi se postići visoka proizvodnost, okolina može zagrijavati kalup. Pri visokim temperaturama, koje obilježavaju preradbu plastomera, gubici topline prema okolini mogu biti višestruko veći od topline dovedene plastomerom, što zahtijeva značajan utrošak energije temperiranja.

Toplina izmijenjena s okolinom ϕ_O :

$$\phi_O = \phi_{St} + \phi_{Slj} + \phi_V \quad (5.46)$$

gdje su: ϕ_{St} - topline izmijenjena zračenjem i konvekcijom kroz stranice kalupa u jedinici vremena (W), ϕ_{Slj} - topline izmijenjena zračenjem i konvekcijom kroz sljubnicu u jedinici vremena (W), ϕ_V - topline izmijenjena provođenjem kroz nosače kalupa ubrizgavalice u jedinici vremena (W).

Pokusima je ustanovljeno da je kod uobičajenih vremena ciklusa ϕ_{Slj} zanemarivo malo, te ga nije potrebno uzimati u obzir pri daljnjim proračunima.

5.4.2.7. Toplina izmijenjena zračenjem kroz stijenke kalupa Φ_Z

Toplina izmijenjena zračenjem kroz stijenke kalupa izračunava se prema izrazu:

$$\alpha_Z = \alpha_Z \cdot A_Z [T_{VK} - T_0] \quad \text{ili} \quad (5.47)$$

$$\alpha_Z = \varepsilon_Z \cdot C_Z \cdot A_Z \left[(T_{VK} / 100)^4 - (T_0 / 100)^4 \right] \quad (5.48)$$

gdje su: α_Z – toplinska prijelaznost zračenjem na stranicama kalupa, A_Z – površina kalupa koja zrači, ε_Z – sposobnost zračenja crnog tijela.

5.4.2.8. Konvektivna izmjena topline Φ_K

$$\Phi_K = \alpha_K \cdot A_Z (T_{VK} - T_0) \quad (5.49)$$

gdje je. α_K – konvektivna toplinska prijelaznosti (iskustvena vrijednost iznosi $15 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$).

5.4.2.9. Toplina dovedena plastomernom taljevinom Φ_p

Toplina dovedena plastomernom taljevinom izračunava se prema izrazu:

$$\Phi_p = \frac{m_g \cdot (h_2 - h_1)}{t_c} \quad (5.50)$$

gdje su: m_g – masa grozda (kg), h_2 – specifična entalpija pri temperature i tlaku preradbe (J/kg), h_1 – specifična entalpija pri prosječnoj temperaturi otpreska u trenutku njegova napuštanja kalupa (J/kg).

Razlika entalpija računa se prema izrazu:

$$(h_2 - h_1) = [(a_3 \cdot T_T + b_3) - (a_2 \cdot T_{PO} + b_2)] \quad (5.51)$$

Tablica 5.5: Vrijednosti koeficijenata za izračunavanje razlike specifičnih entalpija [13]

Plastomer	a_3	b_3	a_2	b_2
PA 66	1,880	-317,20	2,022	-592,49
POM	2,500	-632,50	1,596	-467,67
PP	2,963	-810,37	2,088	-611,71
LDPE	1,979	-428,94	2,651	-776,71
HDPE	3,226	-825,81	2,319	-679,49
PVC	1,739	-582,61	1,124	-329,31
PC	1,933	-626,00	1,477	-432,74
PS, SAN	1,875	-571,88	1,400	-410,20
PMMA	2,647	-882,65	1,550	-454,15

5.4.2.10. Toplina izmijenjena s medijem za temperiranje

$$\Phi_M = -\Phi_p - \Phi_O \quad (5.52)$$

5.4.2.10.1. Promjer kanala za temperiranje

Promjer kanala za temperiranje izračunava se prema izrazu:

$$d_K = \frac{b_O}{n_K \cdot x_K \cdot \pi} \quad (5.53)$$

gdje su: b_O – širina otpreska (m), n_K – broj kanala za temperiranje, x_K – faktor površine kanala za temperiranje.

5.4.2.11. Debljina stijenke kalupne šupljine

Toplinska prohodnost $1/k$:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (5.54)$$

odnosno:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{d_1 \cdot \pi \cdot \alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_K} \ln \frac{d_{K+1}}{d_K} + \frac{1}{d_{n+1} \cdot \pi \cdot \alpha_2} \quad (5.55)$$

gdje su: α_1 – toplinska prijelaznost sa stijenke plastomernog otpreska na stijenku kalupne šupljine (W/m²K), α_2 – toplinska prijelaznost sa stijenke kanala za temperiranje na medij za temperiranje (W/m²K), s_i – debljina i-tog sloja (m), koji se nalazi između plastomera i kanala za temperiranje, λ_i – toplinska provodnost i-tog sloja (W/Km), d_i – unutrašnji promjer gnijezda (m), d_{n+1} – vanjski promjer gnijezda (m).

Većina autora smatra da se α_1 može smatrati beskonačno velikim, te prvi član izraza za računanje toplinske prohodnosti prima vrijednost 0. Ako se pretpostavi da je stijenka kalupne šupljine homogena sa značajkom toplinske provodnosti λ_i , $\alpha_2 = \alpha_M$, jednadžba Φ_M glasi:

$$\Phi_M = \frac{x_s}{\frac{s_K}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_M}} A_{KT} \cdot (T_K - T_M) \quad (5.56)$$

gdje su: x_s – faktor simetričnosti izmjene topline, s_K – debljina stijenke kalupne šupljine (m), α_M – toplinska prijelaznost sa stijenke kanala na medij za temperiranje (W/m²K).

Linder je uveo dimenzioniranje stijenke između taljevine i medija za temperiranje na temelju dva kriterija: dopuštenog napreznja materijala i dopuštenog progiba. Zbog njegove netočnosti uvedena su još dva kriterija, tako da se debljina stijenke određuje na temelju četiri kriterija.

Kriterij 1: Dopušteno smično naprezanje

$$s_K = \frac{3p_K \cdot d_K}{4\tau_{dop}} \quad (5.57)$$

gdje su: τ_{dop} – dopušteno smično naprezanje (N/m²), p_K – tlak u kalupnoj šupljini (Pa).

Kriterij 2: Dopušteno savojno naprezanje

$$s_K = \left(\frac{p_K \cdot d_K^2}{2\sigma_{dop}} \right)^{1/2} \quad (5.58)$$

gdje je: σ_{dop} – dopušteno savojno naprezanje.

Na osnovi iskustva stečenog s konstruktorskim izvedbama na kojima su primjenjiva ova dva kriterija (Linder), došlo se do zaključka da su debljine stijenke kalupne šupljine pretanke. Zbog toga je razvijen dopunski kriterij određivanja debljine stijenke kalupne šupljine – kriterij akumuliranja topline.

Kriterij 3: Akumuliranje topline

Ovaj kriterij zahtijeva uvođenje dva nova pojma:

toplinski tok dovođenja topline ϕ_{PD} i toplina akumulirana u jedini vremena ϕ_A .

Toplinski tok dovođenja topline:

$$\phi_{PD} = \frac{m_g \cdot \Delta h}{t_h} \quad (5.59)$$

Akumulirana toplina:

$$\phi_A = \phi_{PD} + \phi_O + \phi_M \quad (5.60)$$

Na osnovi toga, debljina stijenke kalupne šupljine iznosi:

$$s_K = \frac{\phi_A \cdot t_c}{b_O \cdot l_K \cdot c_K \cdot \rho_K \cdot (T_K - T_{KT})} \quad (5.61)$$

gdje su: ρ_K - gustoća materijala stijenke kalupne šupljine (kg/m^3), c_K – specifični toplinski kapacitet materijala stijenke kalupne šupljine (J/kgK), T_{KT} – temperatura stijenke kanala za temperiranje (K).

Kriterij 4: Dopušteni kut izoterma

Ovaj kriterij služi kao provjera, na kraju proračuna, da li su debljina stijenke kalupne šupljine i parametri medija za temperiranje pravilno odabrani. Kut izoterma iskustveno se kreće od 25° do 40° . Dopušteni kut izoterma omogućuje izračunavanje maksimalne i minimalne vrijednosti debljine stijenke.

$$s_{Kmax} = \frac{1}{2} \left(\frac{b_O}{n_K \cdot \tan(\beta_{min})} - d_K \right) \quad (5.62)$$

$$s_{Kmin} = \frac{1}{2} \left(\frac{b_O}{n_K \cdot \tan(\beta_{max})} - d_K \right) \quad (5.63)$$

Kut izoterma jednak je:

$$\beta = \arctg \left(\frac{b_O}{n_K \cdot (2s_K + d_K)} \right) \quad (5.64)$$

Nakon dobivenih vrijednosti za debljinu stijenke prilazi se provjeri maksimalnog progiba:

$$f_{\max} = \frac{p_K \cdot d_K^2}{s_K} \left(\frac{d_K^2}{32E_r s_K} + \frac{0,15}{G} \right) \quad (5.65)$$

gdje su: E_r – modul elastičnosti (N/m²), G – modul smičnosti (N/m²).

5.4.3. Mehanički proračun kalupa [10]

Mehanički proračun kalupa predstavlja zadnji korak u fazi dimenzioniranja elemenata kalupa, pri čemu je potrebno provesti nekoliko aktivnosti: proračun kinematike kalupa, dimenzioniranje elemenata kalupa, te proračun krutosti kalupa u smjeru i okomito na smjer otvaranja kalupa.

5.4.3.1. Proračun kinematike kalupa

Proračun kinematike kalupa obuhvaća proračune pokretnih elemenata kalupa, duljine njihova gibanja i njihove duljine. Proračun kinematike kalupa posebice je važan radi osiguranja ispravnog i sigurnog vađenja otpreska iz kalupa.

Prva aktivnost kinematičkog proračuna kalupa je proračun potrebnog otvaranja kalupa (odmicanje pomične od nepomične polovice kalupa) koja ovisi o visini grozda (h_g) i visini otpreska (h_o). Pri tome treba osigurati nesmetano vađenje grozda iz kalupa, pa se navedenim visinama dodaje sigurnosni dodatak (h_d).

Proračun potrebnog otvaranja kalupa h_{OK} :

$$h_{OK} = h_g + h_{op} + h_d \quad (5.66)$$

gdje su: h_g – visina grozda (m), h_{op} – visina otpreska u pomičnom dijelu kalupa (m), h_d – dodatno otvaranje kalupa (m).

Visina grozda h_g :

$$h_g = h_o + h_u \quad (5.67)$$

gdje su: h_o – visina otpreska (m), h_u – visina uljevka (m).

Minimalni potrebni razmak između steznih ploča ubrizgavalice h_{Umin} :

Iz projektne skice kalupa proizlazi duljina kalupa (ukupna visina svih kalupnih ploča). Na temelju potrebne visine otvaranja kalupa i visine kalupa moguće je izračunati minimalni potrebni razmak između steznih ploča ubrizgavalice:

$$h_{Umin} = h_{OK} + L_K \quad (5.68)$$

gdje su: h_{OK} - potrebno otvaranje kalupa (m), L_K - visina kalupa (m).

Usporedbom ove dvije vrijednosti s maksimalnim razmakom između ploča ubrizgavalice moguće je utvrditi zadovoljava li izabrana ubrizgavalica postavljenom uvjetu:

$$h_{Umin} \leq H_{Umax} - \text{maksimalni razmak steznih ploča ubrizgavalice.}$$

5.4.3.2. Dimenzioniranje sustava za vođenje i centriranje

Na temelju načelno određenih rješenja sustava za vođenje i centriranje potrebno je izvršiti njihovo dimenzioniranje obzirom na čvrstoću i deformacije. Uz poznata opterećenja dimenzioniranje se može jednostavno izvesti s pomoću analitičkih izraza iz nauke o čvrstoći.

Dimenzioniranje vodećih stupova d_{VZmin} :

$$d_{VZmin} = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot Q_K \cdot L_{VZ}}{\pi \cdot \sigma_{VZ}}} \quad (5.69)$$

gdje su: Q_K - težina kalupa (N), L_{VZ} - duljina vodećeg zatika (m), σ_{VZ} - čvrstoća materijala vodećeg zatika (N/m²)

Progib vodećeg zatika f_{VZ} :

$$f_{VZ} = \frac{Q_K \cdot L_{VZ}^3}{3 \cdot E_s \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{VZ}^4}{14} + \pi \cdot d_{VZ}^2 \cdot a^2 \right)} \quad (5.70)$$

gdje su: a - razmak središnje osi gornjih vodilica i vodoravne osi ubrizgavalice (m), E_s - modul savitljivosti materijala vodećeg zatika (N/m²).

Potrebno je naglasiti da se najčešće ovi elementi odabiru kao standardni, te nije potrebno njihovo dimenzioniranje, već treba izabrati odgovarajuće standardne elemente kalupa (izmjere elemenata sustava za vođenje i centriranje prilagođene su izmjerama ploča kućišta kalupa).

5.4.3.3. Proračun sile vađenja otpreska iz kalupa i elemenata sustava za vođenje

Pri proračunu kalupa za injekcijsko prešanje plastomera potrebno je voditi računa i o silama vađenja otpreska iz kalupne šupljine, te dimenzioniranju elemenata sustava za vađenje otpreska iz kalupa (izbacivala).

Sila vađenja otpreska iz kalupa F_v :

$$F_v = \mu \cdot p_K \cdot A_0 \quad (5.71)$$

gdje su: μ - faktor trenja između plastomera i elemenata kalupne šupljine, A_0 - površina elemenata kalupne šupljine u dodiru s otpreskom (m^2).

5.4.3.4. Dimenzioniranje sustava za odzračivanje

Pri određivanju izmjera kanala za odzračivanje treba pažljivo definirati duljinu i presjek kanala koji će omogućiti nesmetan izlazak zraka iz kalupne šupljine, ali koji će spriječiti ulaz plastomerne taljevine u kanal čime bi se kanal začepio.

Osnovne preporuke za određivanje veličine kanala za odzračivanje su:

- dubina kanal treba se kretati u rasponu 0,002 do 0,01 mm, ovisno o vrsti prerađivanog plastomera
- duljina kanala treba se kretati u rasponu od 1 do 3 mm, ovisno o veličini kalupne šupljine
- širina kanala bi trebala biti minimalno 3 mm (poželjno 5 do 6 mm).

5.4.3.5. Proračun krutosti kalupa okomito na smjer otvaranja

U okviru proračuna krutosti kalupa okomito na smjer otvaranja kalupa potrebno je proračunati deformacije stijenki kalupne šupljine okomito na smjer otvaranja kalupa. Njihove deformacije narušavaju tolerancije izmjera i oblika otpreska i sigurnost funkcioniranja čitavog kalupa. Kako se u kalupu pojavljuju različiti oblici elemenata koji oblikuju kalupnu šupljinu, moguće je postaviti različite jednadžbe za njihov proračun. Pri tome, moguće je razlikovati tri tipa proračuna. To su proračuni stlačivanja jezgara, proširenja gnijezda, te progiba bočnih stranica kalupne šupljine.

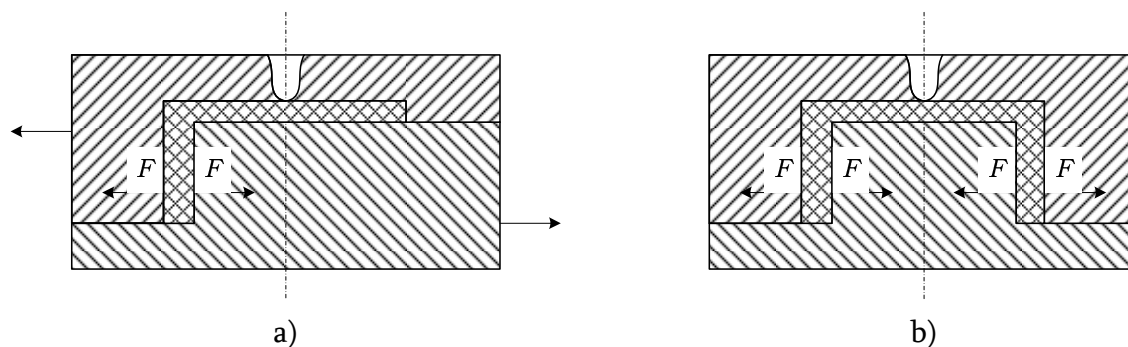
Elastično proširenje kalupne šupljine $\Delta r_{k\check{s}}$:

$$\Delta r_{k\check{s}} = \frac{p_K \cdot r_{k\check{s},u}}{E_r} \cdot \left(\frac{r_{k\check{s},v}^2 + r_{k\check{s},u}^2}{r_{k\check{s},v}^2 - r_{k\check{s},u}^2} + \frac{1}{\nu} \right) \quad (5.72)$$

gdje su: $r_{k\check{s},u}$ - unutrašnji polumjer kalupne šupljine (m), $r_{k\check{s},v}$ - vanjski promjer kalupne šupljine (m), E_r - modul rastezljivosti materijala gnijezda (N/m^2), ν - Poissonov faktor.

Za proračun ostalih slučajeva deformacije elemenata kalupne šupljine okomito na smjer otvaranja kalupa moguće je postaviti slične izraze.

U okviru ovog dijela mehaničkog proračuna potrebno je voditi računa i o uravnoteženju poprečnih sila koje djeluju na elemente kalupne šupljine. Ukoliko je projicirana površina kalupne šupljine na jednoj strani kalupa veća nego na suprotnoj, kalupna šupljina će pri ubrizgavanju nastojati promijeniti svoj položaj u odnosu na jezgru (slika 5.12).



Slika 5.12: Uravnoteženje poprečnih sila: a) neuravnoteženi kalup, b) uravnoteženi kalup [10]

Za uravnoteženje djelovanja takvih sila predlaže se:

- uporaba klinova kao dijelova kalupnih šupljina
- simetrična orijentacija po dvije kalupne šupljine, kako bi se poprečne sile poništile.

5.4.3.6. Proračun krutosti kalupa u smjeru otvaranja kalupa

Pod ovim proračunom podrazumijevaju se aktivnosti na određivanju „disanja“ kalupa, proračuna deformacije sljubnice i proračuna sile zatvaranja kalupa.

Pod disanjem kalupa podrazumijeva se razdvajanje pomičnog od nepomičnog dijela kalupa uslijed djelovanja sile uzgona u kalupnoj šupljini. Dopušteno disanje kalupa kreće se od 0,01 do 0,02 mm. Sila zatvaranja kalupa definira se kao sila kojom je stvoren međusobni dodir pomičnog i nepomičnog dijela kalupa, a može se poistovjetiti sa silom držanja.

Proračun deformacije sljubnice podrazumijeva proračun progiba temeljne ploče kalupa. Ukoliko je poznat dopušteni progib temeljne ploče kalupa, tada je moguće proračunati visinu temeljne ploče.

Visina temeljne ploče h_{tp} :

$$h_{tp} = \left(\frac{5}{32} \cdot \frac{F_d \cdot b_{tp}^3}{l_{tp} \cdot f_{tp} \cdot E_r} \right)^{1/3} \quad (5.73)$$

gdje su: F_d - sila držanja kalupa (N), b_{tp} - razmak između odstoynih letvi kalupa (m), l_{tp} - duljina temeljne ploče (m), f_{tp} - dopušteni progib temeljne ploče (m).

Jednadžba vrijedi za slučaj kada kalupnu šupljinu oblikuje žig koji je upet izravno u temeljnoj ploči. U slučaju kada kalupnu šupljinu oblikuje kalupna ploča s dnom moguće je primijeniti slijedeće izraze.

Proračun progiba dna f_1 :

$$f_1 = \frac{12 \cdot p_K \cdot h^4}{384 \cdot E_r \cdot s_p^3} + \frac{2,66 \cdot p_K \cdot h^2}{8 \cdot E_r \cdot s_p} \quad (5.74)$$

Proračun progiba bočne strane f_2 :

$$f_2 = \frac{12 \cdot p_K \cdot h^4}{8 \cdot E_r \cdot s_p^3} + \frac{2,66 \cdot p_K \cdot h^2}{2 \cdot E_r \cdot s_p} \quad (5.75)$$

gdje su: h - izmjera kalupne šupljine na kojoj djeluje tlak u kalupnoj šupljini (m), s_p - debljina kalupne stijenke kalupne ploče (m).

U slučaju kada je progib kalupne ploče veći od dopuštenog (obično 0,01 do 0,02 mm), potrebno je ili povećati debljinu kalupne ploče ili pridodati temeljnu ploču određene visine. Visinu temeljne ploče potrebno je proračunati za svaki kalup bez obzira rabe li se standardni elementi kalupa ili ne.

Za proračun deformacija okomito na smjer i u smjeru otvaranja kalupa razijeni su i posebni proračunski modeli kao što su modeli opruga s pomoću kojih se pojednostavljuje mehanički proračun kalupa.

5.4.3.7. Proračun sile otvaranja i površinskog pritiska na sljubnicu

U zadnjem koraku mehaničkog proračuna, ujedno i zadnjem koraku faze dimenzioniranja elemenata kalupa, potrebno je proračunati silu otvaranja kalupa i površinski pritisak na sljubnicu.

Sila otvaranja kalupa F_O :

$$F_O = \mu \cdot p_R \cdot A_O \quad (5.76)$$

gdje je: p_R - predtlak u kalupnoj šupljini (određuje se iz dijagrama $p - v - T$) (N/m²).

6. KONSTRUIRANJE KALUPA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE OTPRESKA

6.1. Izbor materijala otpreska

Sigurna i pouzdana isporuka hrane postala je jedna od važnih briga današnjice u prehrambenoj industriji, koja jednako utječe na razvijene zemlje i zemlje u razvoju. Začudno, čak i do 30% gubitaka hrane u zemljama u razvoju su izravan rezultat nepravilnog pakiranja hrane. Upravo zbog toga, prepoznavanje važnost korištenog materijala za pakiranje hrane ima velik utjecaj u prehrambenoj industriji.

Zadatak ovog rada je razvoj kalupa za tankostjeno injekcijsko prešanje konkretnog otpreska – poklopca kutije za sladoled.

Dimenzioniranje poklopca kutije za sladoled nije posebno provođeno, već su usvojene izmjere sličnih proizvoda koji se nalaze na tržištu s debljinom stijenke 0,8 mm. Iako je poklopac relativno jednostavne geometrije, postoje određena ograničenja koja utječu na razvoj otpreska. Ograničenja se razlikuju prema funkcionalnosti, ergonomiji i estetici proizvoda, no u ovom će slučaju svi zahtjevi biti razmatrani istovremeno. Ambalažni materijali moraju izdržati teške uvjete: sigurno očuvanje i zaštita hrane bez ugrožavanja zdravlja potrošača. Ambalažni materijali moraju, jednako, pružiti atraktivno i komercijalno rješenje, odnosno smanjenje cijene, za krajnjeg korisnika. Ergonomski zahtjevi postavljeni na otpresak odnose se prvenstveno na zaobljenost bridova, te meke prijelaze između ploha.

Izbor materijala je ograničen na polipropilen, zbog optimalne kombinacije svojstava protočnosti, žilavosti i tvrdoće. Uz vrlo dobra navedena svojstva, cijenom je polipropilen vrlo atraktivan polimerni materijal pogodan za razvoj sličnih otpresaka.

Polipropilen je plastomer koji se dobiva polimerizacijom propilena (koji nastaje pri krekiranju nafte) pri niskim temperaturama pomoću katalizatora. Sirova masa dolazi u obliku granulata, sličnom vosku. Poluproizvodi dolaze u obliku folija, ploča, cijevi i štapova. Primjenjuje se u brodogradnji, u strojarstvu, u fotoindustriji, u kemijskoj i automobilskoj industriji, itd., za cijevi, dijelove strojeva, kemijske aparate, za ambalažu, itd.

Konačno, odabran je *Borealisov* polipropilen radnog imena Borpact SG930MO, jer je prikladan u primjeni ambalaže za duboko zamrzavanje, kao što su pakiranja kutija za sladoled. Tablica 6.1 prikazuje neka svojstva polipropilena.

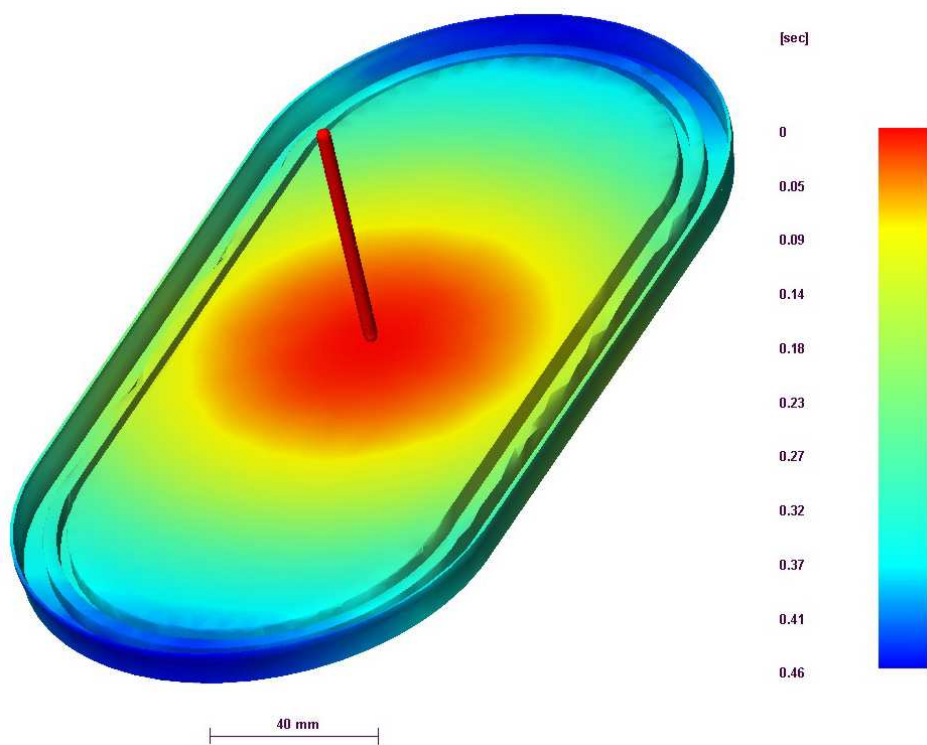
Tablica 6.1: Neka svojstva polipropilena [14]

Svojstvo	Simbol	Jedinica	Vrijednost
Gustoća	ρ	g/cm ³	0,9
Tlak ubrizgavanja	p_a	bar	>1000
Temperatura taljevine	T_T	K	509
Temperatura stijenke kalupne šupljine	T_K	K	308
Temperatura postojanosti oblika	T_{Po}	K	373
Toplinska rastezljivost	α	10 ⁻⁵ m/kgK	18
Specifični toplinski kapacitet	c_p	10 ³ Ws/kgK	2,0
Toplinska provodnost	λ	W/mK	0,17-0,22
Skupljanje	s	%	1-2

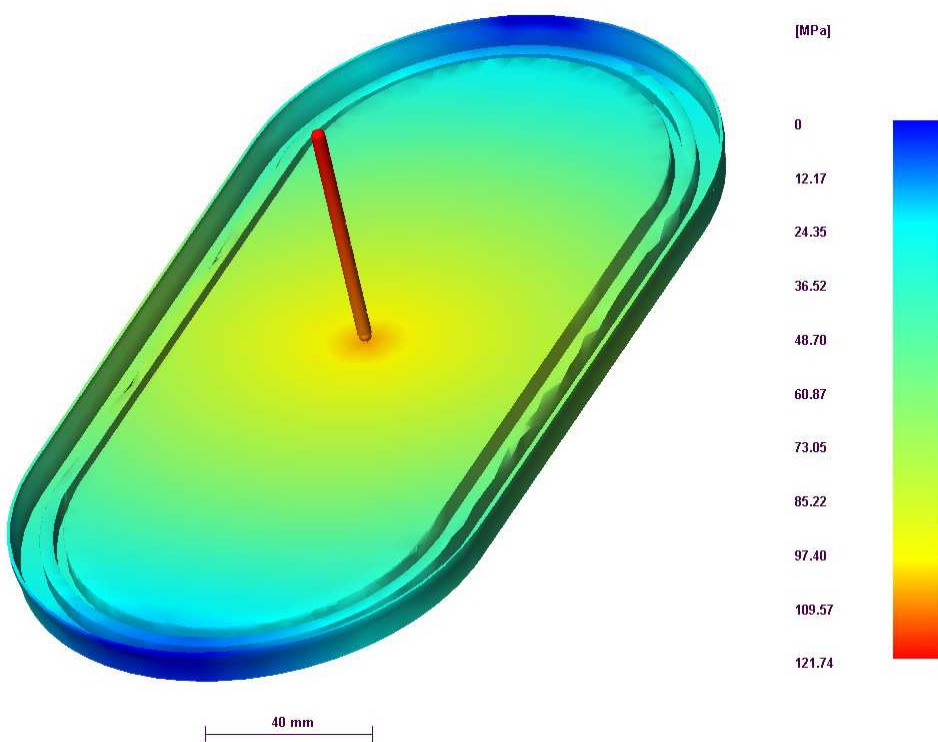
6.2. Provjera tehničnosti otpreska s pomoću računala

Prije samog početka proračuna kalupa za injekcijsko prešanje preporučljivo je provesti analizu punjenja kalupne šupljine na računalu. U svrhu modeliranja otpreska korišten je programski paket CATIA tvrtke Dessault Systemes, a za samu analizu otpreska programski paket Moldflow Advisor, koji obuhvaća analize prikazane slikama 6.1 do 6.8. Program na temelju oblika otpreska, zadanog materijala i mjesta ubrizgavanja plastomerne taljevine grafički prikazuje važne rezultate injekcijskog prešanja otpreska.

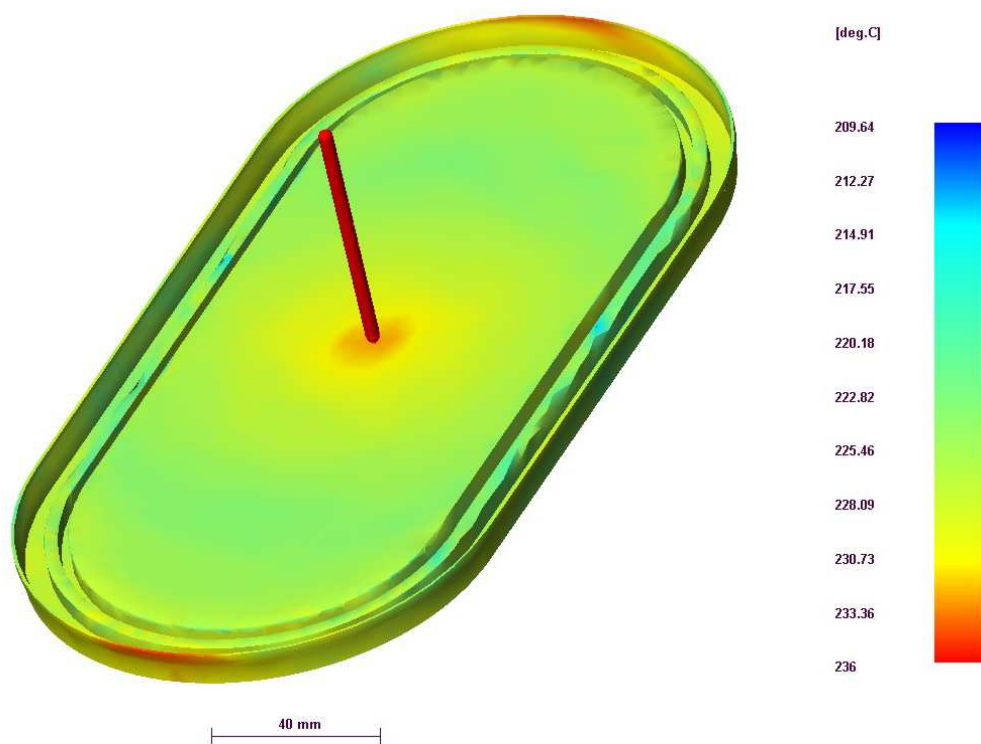
Rezultate treba promatrati kao preporuku prilikom konstruiranja kalupa, jer se u analizi nisu koristili podaci kao što su položaj kanala za temperiranje, materijal kalupnih ploča, te brzina i temperatura medija za temperiranje. Zbog nedostatka informacija program prikazuje najnepovoljnije rezultate, tako da je prilikom konstruiranja kalupa potrebno posvetiti posebnu pažnju kritičnim mjestima.



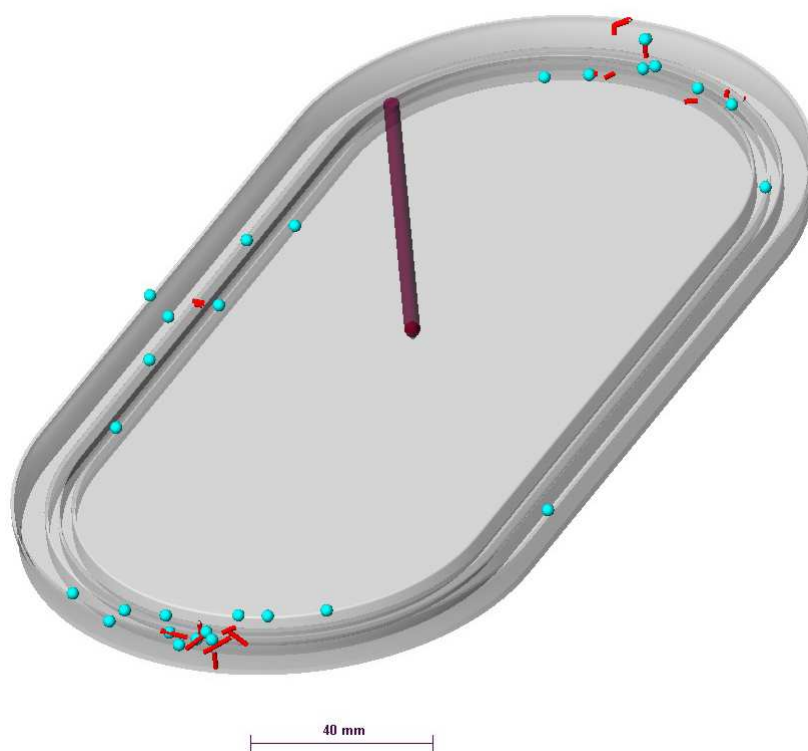
Slika 6.1: Vrijeme popunjavanja kalupne šupljine



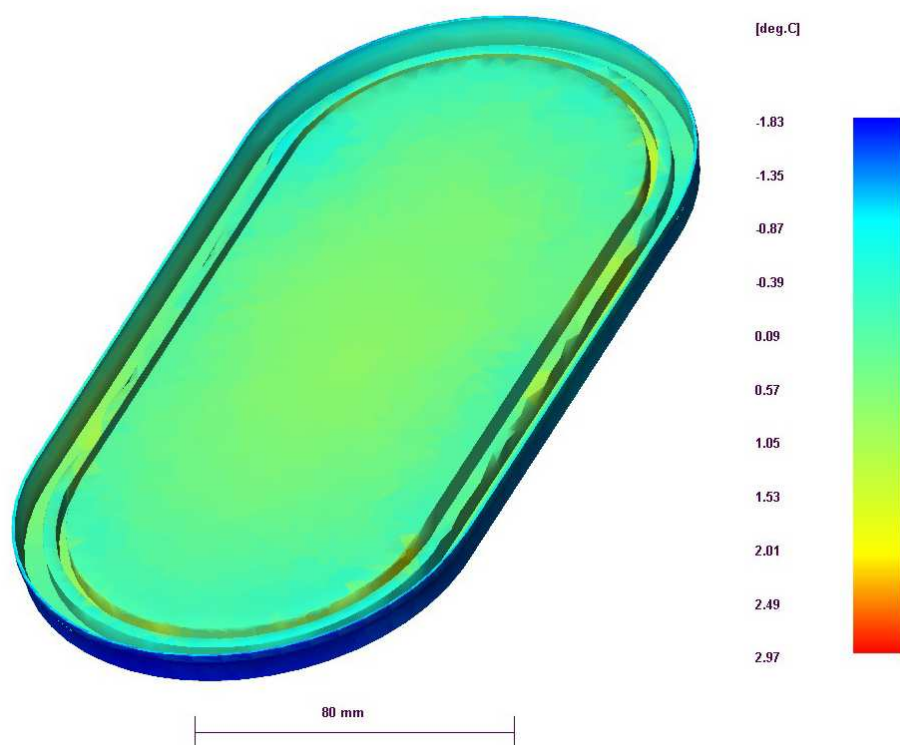
Slika 6.2: Tlak ubrizgavanja



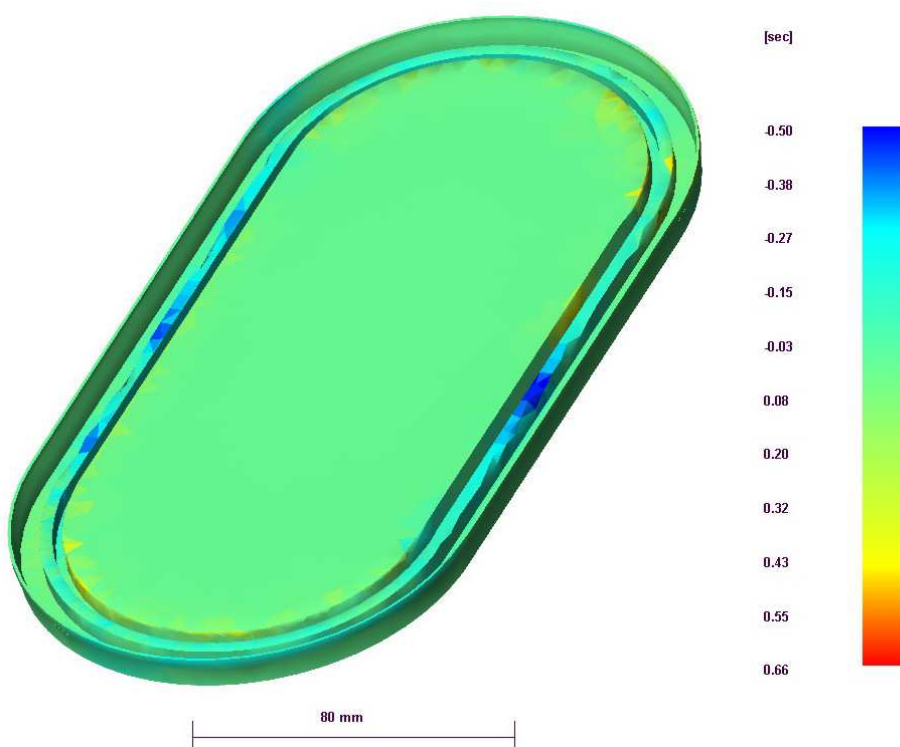
Slika 6.3: Temperatura čela taljevine



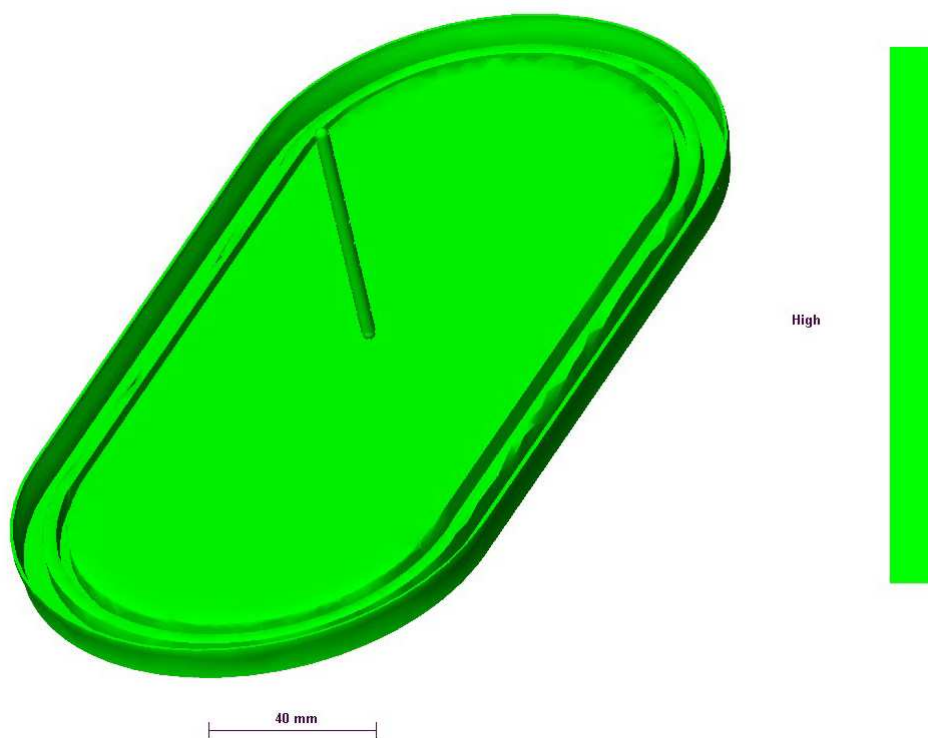
Slika 6.4: Uključine zraka



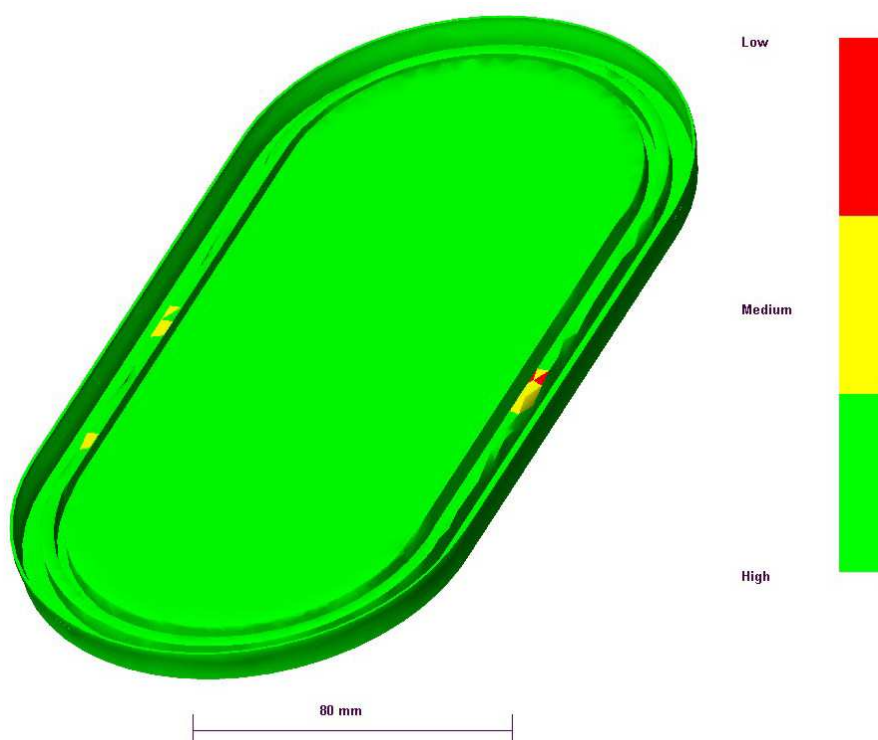
Slika 6.5: Razdioba površinskih temperatura



Slika 6.6: Razdioba vremena hlađenja



Slika 6.7: Analiza vjerojatnosti ispunjavanja kalupne šupljine



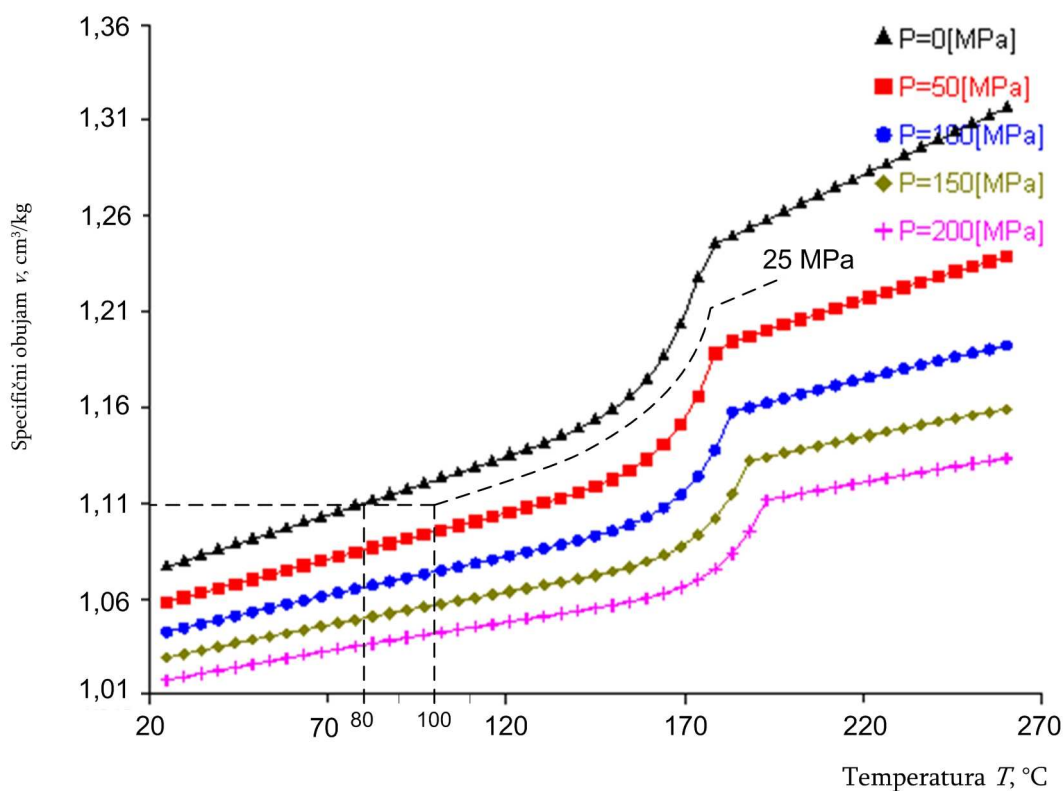
Slika 6.8: Analiza predviđene kakvoće površine otpreska

6.3. Reološki proračun kalupa

Pri određivanju potrebnog tlaka u kalupnoj šupljini korišten je dijagram $p-v-T$ za PP (slika 6.9). Na temelju ulaznih podataka, pretpostavljenoj temperaturi otvaranja kalupa ($\vartheta_{OK} = 60^\circ\text{C}$) i temperaturi postojanosti oblika ($\vartheta_{PO} = 100^\circ\text{C}$) određen je tlak u kalupnoj šupljini $p_K = 25 \text{ MPa}$ (250 bar).

Za proračun pada tlaka u uljevnom sustavu kalupne šupljine raspolaže se podacima:

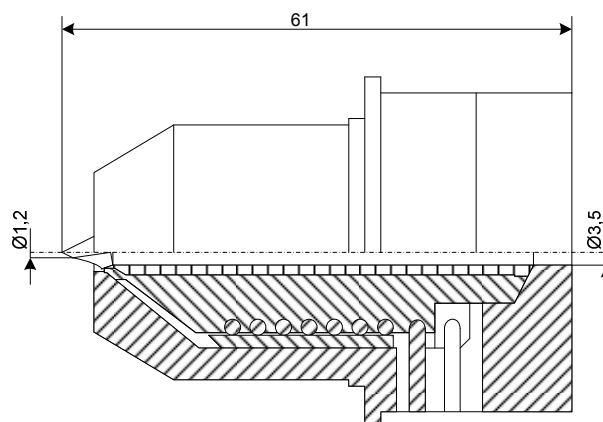
- obujam ubrizgavanja	$V_u = 31590 \text{ mm}^3$
- vrijeme ubrizgavanja	$t_u = 0,5 \text{ s}$
- konstanta materijala	$K_{OT} = 2,382 \cdot 10^5$
- temperaturni koeficijent	$\beta = 4,036 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
- temperatura taljevine	$T_T = 236^\circ\text{C}$
- eksponent tečenja taljevine	$m = -0,8943$
- gustoća taljevine	$\rho = 900 \text{ kg/m}^3$
- specifični toplinski kapacitet taljevine	$c_p = 2000 \text{ J/kg K}$
- duljina mlaznice	$l_m = 60,9 \text{ mm}$
- promjer mlaznice	$d_m = 3,5 \text{ mm}$
- tlak potreban u kalupnoj šupljini	$p_K = 25 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
- površina otpreska u smjeru otvaranja	$A = 15500 \text{ mm}^2$
- koeficijent sigurnosti	$k = 1,2$



Slika 6.9: Dijagram $p-v-T$ za PP Borpact SG930MO

Proračun pada tlaka u toploj mlaznici

Jedna kalupna šupljina, te vruća mlaznica isključuju potrebu za uljevkom, uljevnim kanalom. Samim time i faza definiranja početnih izmjera uljevnog sustava nije potrebna.



Slika 6.10: Vruća mlaznica HASCO Z101G/32x61 [15]

Minimalni potrebni tlak ubrizgavanja plastomerne taljevine Δp_{umin} preuzet je iz računalne simulacije (slika 6.2):

$$\Delta p_{\text{umin}} = 121,74 \text{ N/mm}^2$$

Potreban tlak ubrizgavalice p_{uk} :

$$p_{\text{uk}} = p_k + \Delta p_{\text{umin}} = 25 \cdot 10^6 + 121,74 \cdot 10^6 = 146,74 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Sila držanja (zatvaranja) kalupa F_d :

$$F_d = p_k \cdot (S_{\text{ot}} + S_{\text{us}}) \cdot k = 25 \cdot 10^6 \cdot (15,5 \cdot 10^{-3}) \cdot 1,2 = 465 \cdot 10^3 \text{ N} = 465 \text{ kN}$$

Odabranom ubrizgavalicom (tablica 6.2) može se postići vrijednost sile držanja kalupa u iznosu od 730 kN, te izabrana ubrizgavalica zadovoljava kriterij sile držanja kalupa.

Tablica 6.2: Najvažnije veličine ubrizgavalice SUMITOMO SE750DUZ [16]

Karakteristika	Jedinica	Vrijednost
Promjer pužnog vijka	mm	22
Kapacitet plastificiranja	g/s	5
Brzina ubrizgavanja	cm ³ /s	190
Maksimalni obujam ubrizgavanja	cm ³	40
Maksimalni tlak ubrizgavanja	MPa	274
Sila držanja kalupa	kN	730
Maksimalna udaljenost između steznih ploča	mm	580
Maksimalna visina otvaranja	mm	410
Maksimalna sila vadenja otpreska	kN	26
Maksimalni put vadenja otpreska	mm	80

6.4. Toplinski proračun kalupa

6.4.1. Proračun vremena i temperatura

6.4.1.1. Efektivna toplinska difuzivnost a_{ef}

Podaci potrebni za proračun efektivne temperaturne provodnosti su:

- temperatura stijenke kalupne šupljine $T_k = 303 \text{ K}$
- koeficijent jednačbe pravca $a_1 = -0,0106 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 $b_1 = 9,8494 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

$$a_{ef} = a_1 \cdot T_k + b_1 = -0,0106 \cdot 10^{-8} \cdot 308 + 9,8494 \cdot 10^{-8} = 6,585 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{s}$$

6.4.1.2. Proračun pomoćnog vremena t_p

Vrijeme čišćenja i podmazivanja kalupa t_m :

$$t_m = t_{\check{c}} + x_{k\check{s}} \cdot t_{m1} = 0 \text{ s}$$

Vrijeme posluživanja otvorenog kalupa t_{k1} :

$$t_{k1} = a_{k1} + x_{k\check{s}} \cdot b_{k1} = 0 + 0 = 0 \text{ s}$$

Strojno vrijeme zatvaranja kalupa t_{zs} :

$$t_{zs} = 1 \text{ s (značajka ubrizgavalice)}$$

Vrijeme posluživanja zatvorenog kalupa t_{k2} :

$$t_{k2} = a_{k2} + x_{k\check{s}} \cdot b_{k2} = 0 + 0 = 0 \text{ s}$$

Vrijeme zatvaranja kalupa t_z :

$$t_z = t_{zs} + t_{k2} = 1 + 0 = 1 \text{ s}$$

Vrijeme ukapčanja t_s :

$$t_s = 0 \text{ s}$$

Vrijeme približavanja mlaznice t_{mp} :

$$t_{mp} = 0,5 \text{ s (značajka ubrizgavalice)}$$

Vrijeme posluživanja zatvorenog kalupa t_{k3} :

$$t_{k3} = 0 \text{ s}$$

Strojno vrijeme otvaranja t_{os} :

$$t_{os} = 1 \text{ s (značajka ubrizgavalice)}$$

Vrijeme otvaranja kalupa t_o :

$$t_o = t_{k3} + t_{os} = 0 + 1 = 1 \text{ s}$$

Dopunsko vrijeme izbacivanja t_{id} :

$$t_{id} = a_{k4} + x_{ks} \cdot b_{k4} = 0 + 1 \cdot 1 = 1 \text{ s}$$

Vrijeme posluživanja kalupa pri izbacivanju t_{k4} :

$$t_{k4} = a_{k4} + x_{ks} \cdot b_{k4} = 0 + 1 \cdot 1 = 1 \text{ s}$$

Vrijeme izbacivanja grozda t_{iz} :

$$t_{iz} = t_{k4} + t_{id} = 1 + 1 = 2 \text{ s}$$

Pomoćno vrijeme t_p :

$$t_p = t_m + t_{k1} + t_z + t_s + t_{mp} + t_o + t_{iz} = 0 + 0 + 1 + 0 + 0,5 + 1 + 2 = 4,5 \text{ s}$$

6.4.1.3. Proračun ciklusa injekcijskog prešanja

Vrijeme hlađenja otpreska t_h :

- koeficijent za ploču

$$a_{10} = 0$$

$$a_{20} = 0$$

$$K_O = 1 + a_{10}^2 + a_{20}^2 = 1 + 0 + 0 = 1$$

- karakteristična izmjera stijenke otpreska

$$b_O = 0,8 \text{ mm}$$

- temperatura taljevine

$$T_T = 503 \text{ K}$$

- temperatura unutrašnjosti

$$T_U \text{ (zamjenjuje se s } T_{Po})$$

- temperatura postojanosti oblika

$$T_{Po} = 373 \text{ K}$$

- koeficijent unutrašnjosti

$$K_{U1} = 4/\pi$$

- koeficijent unutrašnjosti

$$K_{U2} = 8/\pi^2$$

$$\hat{t}_h = \frac{b_O^2}{K_O \cdot \pi^2 \cdot a_{ef}} \ln \left(K_{U1} \frac{T_T - T_K}{T_U - T_K} \right) = \frac{0,8^2 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot \pi^2 \cdot 6,585 \cdot 10^{-8}} \ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{509 - 308}{373 - 308} \right) = 1,35 \text{ s}$$

$$\bar{t}_h = \frac{b_O^2}{K_O \cdot \pi^2 \cdot a_{ef}} \ln \left(K_{U2} \frac{T_T - T_K}{T_U - T_K} \right) = \frac{0,8^2 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot \pi^2 \cdot 6,585 \cdot 10^{-8}} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{509 - 308}{373 - 308} \right) = 0,9 \text{ s}$$

U cilju postizanja što većeg stupnja proizvodnosti, potrebno je izabrati najkraće vrijeme hlađenja otpreska. Zbog toga se za daljnja razmatranja uzima vrijeme hlađenja otpreska $t_h = 0,9 \text{ s}$.

Proračun ostalih vremena koja sačinjavaju vrijeme hlađenja otpreska:

- vrijeme ubrizgavanja $t_u = 0,46$ s
- vrijeme djelovanja naknadnog pritiska $t_{np} = 1,3$ s
- masa otpreska $m_o = 28,43$ g
- učin plasticiranja $q_p = 5$ g/s
- vrijeme plastificiranja

$$t_{ps} = m_o / q_p = 28,43 / 5 = 5,7 \text{ s}$$

- vrijeme vraćanja mlaznice u početni položaj $t_{mr} = 0,5$ s
- izabrano vrijeme za hlađenje otpreska $t_h = 0,82$ s
- dopunsko vrijeme hlađenja

$$t_d = t_h - (t_u + t_{np} + t_{ps} + t_{mr}) = 0,9 - (0,46 + 1,3 + 5,7 + 0,5) = -7,18 \text{ s}$$

Negativna vrijednost dopunskog vremena hlađenja nije smisljena, stoga vrijeme hlađenja mora biti najmanje 8 s ($t_d = 0$).

U slučaju kada je vrijeme hlađenja dulje od proračunatog treba proračunati prosječnu temperaturu otpreska, radi proračuna entalpije.

$$\ln(K_U \cdot T) = t_h \cdot K_0 \cdot \pi^2 \cdot a_{ef} / s_o^2 = 8 \cdot 1 \cdot \pi^2 \cdot 6,585 \cdot 10^{-8} / (0,8 \cdot 10^{-3})^2 = 8,12$$

$$T = e^{8,12} \pi^2 / 8 = 1,26$$

$$\bar{T}_{PO} = \left(\frac{T_T - T_K}{T} \right) + T_K = \left(\frac{509 - 308}{1,26} \right) + 308 = 467,5 \text{ K}$$

Vrijeme ciklusa t_c :

$$t_c = t_h + t_p = 8 + 4,5 = 12,5 \text{ s}$$

6.4.1.4. Proračun temperatura

Bezdimenzijska značajka A :

$$A = \frac{t_h}{2 \cdot t_c} = \frac{8}{2 \cdot 12,5} = 0,32$$

Početna temperatura T_p :

Materijal žiga i matrice izabran je DIN X38CrMoV5-1 (čelik 4751).

- toplinska prodornost
 - materijala stijenke kalupne šupljine $b_K = 10\,238 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$
 - plastomernog materijala $b_P = 650 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$

$$T_P = \frac{T_K(b_K + b_P) - (1 - A)T_T b_P}{b_K + b_P A} = \frac{308 \cdot (10238 + 650) - (1 - 0,32) \cdot 509 \cdot 650}{10238 + 650 \cdot 0,32} = 299,5 \text{ K}$$

Dodirna temperatura T_D :

$$T_D = \frac{b_K T_P + b_P T_T}{b_K + b_P} = \frac{10238 \cdot 299,5 + 650 \cdot 509}{10238 + 650} = 312 \text{ K}$$

Temperatura otvaranja kalupa T_{OK} :

$$T_{OK} = 2 \cdot T_K - T_D = 2 \cdot 308 - 312 = 304 \text{ K}$$

6.4.1.5. Temperatura i toplinska svojstva medija za temperiranje

Pretpostavljena temperatura medija za temperiranje:

Uzimajući u obzir temperature u kalupu, kao medij za temperiranje izabrana je voda.

- temperaturni gradijent $\Delta T_{MK} = 18 \text{ K}$ (izabire se proizvoljno)
(Za postizanje veće kvalitete, odabire se manji temperaturni gradijent)

$$T_M = T_K - \Delta T_{MK} = 308 - 18 = 290 \text{ K}$$

Ostala svojstva medija za temperiranje:

- gustoća $\rho_M = 971,8 \text{ kg/m}^3$
- kinematska viskoznost $\nu_M = 0,365 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- toplinska provodnost $\lambda_M = 0,648 \text{ W/mK}$
- specifični toplinski kapacitet $c_M = 4174 \text{ m}^2/\text{s}^2\text{K}$
- Prandtlov broj $Pr = 2,21$

6.4.2. Toplinska bilanca

6.4.2.1. Proračun izmjene topline s okolinom

Temperatura kalupa u dodiru s okolinom T_{VK} :

Ova temperatura može se proračunati s pomoću dvije regresijske jednadžbe. Potrebno je izvršiti proračun pomoću obje i uzeti u obzir onu koja daje veći temperaturni gradijent $T_{VK} - T_O$.

- temperatura okoline $T_O = 297 \text{ K}$

$$T_{VK1} = 0,427 \cdot T_O + 0,823 \cdot T_M - 68,96 = 0,427 \cdot 297 + 0,823 \cdot 290 - 68,96 = 296,5 \text{ K}$$

$$T_{VK2} = T_O + 0,725 \cdot T_M - 211,4 = 297 + 0,725 \cdot 290 - 211,4 = 296 \text{ K}$$

U ovom slučaju za daljnji proračun izabire se:

$$T_{VK} = T_{VK1} = 296,5 \text{ K}$$

Toplinska prijelaznost zračenjem α_z :

- sposobnost zračenja realnog tijela $\varepsilon_z = 0,35$ – sjajno brušeni čelik
0,5 – lagano oksidirana površina
0,35 - izabrano
- zračivost crnog tijela $C_z = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$\alpha_z = \varepsilon_z \cdot C_z = 0,35 \cdot 5,67 = 1,985 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Toplinska prijelaznost uslijed konvekcije i zračenja

- konvektivna toplinska prijelaznost $\alpha_k = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$\alpha_{st} = \alpha_z + \alpha_k = 1,985 + 15 = 16,985 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korigirana vrijednost toplinske prijelaznosti α_{st}^* :

- visina kalupa $H_k = 346 \text{ mm}$
- širina kalupa $B_k = 346 \text{ mm}$
- duljina kalupa $L_k = 238 \text{ mm}$

$$A_1 = L_k \cdot H_k = 0,238 \cdot 0,346 = 0,0823 \text{ m}^2$$

$$A_2 = L_k \cdot B_k = 0,238 \cdot 0,346 = 0,0823 \text{ m}^2$$

$$\alpha_{st}^* = \frac{A_1 + A_2}{A_1} \cdot \alpha_{st} = \frac{0,0823 + 0,0823}{0,0823} \cdot 16,985 = 33,97 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Toplina izmijenjena kroz stranice kalupa ϕ_{st} :

$$\phi_{st} = 2 \cdot A_1 \cdot \alpha_{st}^* \cdot (T_{vk} - T_o) = 2 \cdot 0,0823 \cdot 33,97 \cdot (296,5 - 297) = -2,79 \text{ W}$$

Negativan predznak označuje da okolina zagrijava kalup.

Toplina izmijenjena provođenjem s nosačima kalupa:

Bez izolacijskog sloja β_v^* :

- faktor proporcionalnosti (korekcije) $\beta_v = 98 \text{ W/m}^2\text{K}$ (za Č.4173)

$$\beta_v^* = \frac{B_k + H_k}{H_k} \cdot \beta_v = \frac{0,346 + 0,346}{0,346} \cdot 98 = 196 \text{ W/m}^2\text{K}$$

S izolacijskim slojem β_l^* :

- toplinska provodnost kalupnih ploča $\lambda_k = 52 \text{ W/mK}$
- toplinska provodnost izolacije $\lambda_l = 0,21 \text{ W/mK}$
- debljina izolacije $s_l = 7 \text{ mm}$

$$\beta_1 = \frac{1}{1 + \frac{s_1 \cdot \lambda_k}{L_k \cdot \lambda_1}} = \frac{1}{1 + \frac{0,007 \cdot 52}{0,238 \cdot 0,21}} = 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\beta_1^* = \beta_1 \cdot \beta_v = 0,12 \cdot 196 = 23,52 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Tlocrtna površina steznih ploča A_{KS} :

$$A_{KS} = 2 \cdot B_K \cdot H_K = 2 \cdot 0,346 \cdot 0,346 = 0,24 \text{ m}^2$$

Toplinski tok provođenja topline:

Bez izolacijskog sloja ϕ_v :

$$\phi_v = \beta_v^* \cdot A_{KS} (T_{VK} - T_O) = 196 \cdot 0,24 \cdot (296,5 - 297) = -23,52 \text{ W}$$

S izolacijskim slojem ϕ_{vI} :

$$\phi_{vI} = \beta_1^* \cdot A_{KS} (T_{VK} - T_O) = 23,52 \cdot 0,24 \cdot (296,5 - 297) = -2,82 \text{ W}$$

Toplina izmijenjena s okolinom:

Bez izolacijskog sloja ϕ_O :

$$\phi_O = \phi_{St} + \phi_v = -2,97 - 23,52 = -26,5 \text{ W}$$

S izolacijskim slojem ϕ_{OI} :

$$\phi_{OI} = \phi_{St} + \phi_{vI} = -2,97 - 2,82 = -5,8 \text{ W}$$

6.4.2.2. Toplina koju dovodi plastomer

Razlika entalpija $h_1 - h_2$:

- vrijednost koeficijenata za izračunavanje razlike specifičnih entalpija

$a_3 = 2,963$
$b_3 = -810,37$
$a_2 = 2,088$
$b_2 = -661,71$

$$(h_2 - h_1) = 1000 \cdot \left[(a_3 \cdot T_T + b_3) - (a_2 \cdot \bar{T}_{PO} + b_2) \right]$$

$$(h_2 - h_1) = 1000 \cdot \left[(2,963 \cdot 509 - 810,37) - (2,088 \cdot 467,5 - 661,71) \right] = 3,83 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$$

Toplinski tok plastomera ϕ_p :

$$\phi_p = \frac{m_O \cdot (h_2 - h_1)}{t_c} = \frac{0,02843 \cdot 3,83 \cdot 10^5}{12,5} = 871 \text{ W}$$

6.4.2.3. Toplina izmijenjena s medijem za temperiranje

Kako plastomer dovodi kalupu toplinu, medij za temperiranje i okolina moraju odvesti ovu količinu topline.

Bez izolacijskog sloja ϕ_M :

$$\phi_M = \phi_P - \phi_O = 871 + 26,5 = 897,5 \text{ W}$$

S izolacijskim slojem ϕ_{MI} :

$$\phi_{MI} = \phi_P - \phi_{OI} = 871 + 5,8 = 876,8 \text{ W}$$

S obzirom da je razlika u izmijenjenoj toplini sa i bez izolacijskog sloja minimalna, odabrana je konstrukcija kalupa bez izolacijskog sloja.

6.4.3. Izmjere i parametri sustava za temperiranje

6.4.3.1. Izmjere kanala za temperiranje

Promjer kanala za temperiranje d_K :

- širina otpreska $b_O = 120 \text{ mm}$
- broj kanala za temperiranje $n_K = 4$
- faktor površine kanala za temperiranje $x_K = 1,2$

$$d_K = \frac{b_O}{n_K \cdot x_K \cdot \pi} = \frac{0,120}{4 \cdot 1,2 \cdot \pi} = 0,0079 \text{ m}$$

Vrijednost promjera kanala za temperiranje se zaokružuje:

$$d_K = 0,008 \text{ m} = 8 \text{ mm}$$

Površina kanala za temperiranje A_{KT} :

- duljina kanala za temperiranje $l_K = 240 \text{ mm}$

$$A_{KT} = d_K \cdot l_K \cdot n_K \cdot \pi = 0,008 \cdot 0,240 \cdot 4 \cdot \pi = 0,024 \text{ m}^2$$

6.4.3.2. Optimiranje debljine stijenke kalupne šupljine

Pri optimiranju valja težiti da kanali budu što udaljeniji od površine kalupne šupljine u dodiru s plastomernom taljevinom. Stoga se pri usporedbi pri različitim kriterijima uvijek izabire veća debljine stijenke s_K .

Kriterij 1: Dopušteno smično naprezanje

- tlak u kalupnoj šupljini $p_K = 25 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$
- dopušteno smično naprezanje materijala kalupnih ploča $\tau_{\text{dop}} = 1,2 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

$$s_K = \frac{3 p_K \cdot d_K}{4 \tau_{\text{dop}}} = \frac{3 \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 0,008}{4 \cdot 1,2 \cdot 10^8} = 0,00125 \text{ m} = 1,25 \text{ mm}$$

Kriterij 2: Dopušteno savojno naprezanje

- dopušteno savojno naprezanje materijala kalupnih ploča $\sigma_{\text{dop}} = 2,1 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

$$s_K = \left(\frac{p_K \cdot d_K^2}{2 \sigma_{\text{dop}}} \right)^{1/2} = \left(\frac{25 \cdot 10^6 \cdot 0,008^2}{2 \cdot 2,1 \cdot 10^8} \right)^{1/2} = 0,0019 \text{ m} = 1,9 \text{ mm}$$

Kriterij 3: Akumuliranje topline

- temperatura stijenke kanala za temperiranje $T_{KT} = 303 \text{ K}$ (postavlja se na kriteriju, da razlika $T_K - T_{KT}$ bude što manja, a da pri tome $T_{KT} > T_p$)

-specifični toplinski kapacitet materijala kalupnih ploča

$$\phi_{PD} = \frac{m_O \cdot \Delta h}{t_h} = \frac{0,02843 \cdot 3,83 \cdot 10^5}{8} = 1361 \text{ W}$$

$$\phi_A = \phi_{PD} + \phi_O + \phi_M = 1361 - 26,5 + 897,5 = 2232 \text{ W}$$

- gustoća materijala kalupnih ploča $\rho_K = 7,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

$$c_K = 602 \text{ m}^2/\text{s}^2\text{K}$$

$$s_K = \frac{\phi_A \cdot t_c}{b_O \cdot l_K \cdot c_K \cdot \rho_K \cdot (T_K - T_{KT})} = \frac{2232 \cdot 12,5}{0,12 \cdot 0,24 \cdot 602 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot (308 - 303)} = 0,041 \text{ m} = 41 \text{ mm}$$

Kriterij 4: Dopušteni kut izoterme

- minimalni kut izoterme $\beta_{\min} = 25^\circ$
- maksimalni kut izoterme $\beta_{\max} = 30^\circ$

$$s_{K\max} = \frac{1}{2} \left(\frac{b_O}{n_K \cdot \tan(\beta_{\min})} - d_K \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{0,12}{4 \cdot \tan(25^\circ)} - 0,008 \right) = 0,028 \text{ m} = 28 \text{ mm}$$

$$s_{K\min} = \frac{1}{2} \left(\frac{b_O}{n_K \cdot \tan(\beta_{\max})} - d_K \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{0,12}{4 \cdot \tan(30^\circ)} - 0,008 \right) = 0,021 \text{ m} = 21 \text{ mm}$$

Kao mjerodavna veličina debljine stijenke kalupne šupljine, na temelju ova četiri kriterija odabire se: $s_K = 0,022 \text{ m} = 22 \text{ mm}$

Provjera progiba za izabrani s_k :

- dopušteni progib stijenke kalupne šupljine $f_{dop} = 10^{-3} \text{ mm}$
- modul rastezljivosti materijala kalupne šupljine $E_r = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
- modul smičnosti materijala stijenke kalupne šupljine $G = 8,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$

$$f_{\max} = \frac{p_K \cdot d_K^2}{s_K} \left(\frac{d_K^2}{32 E_r s_K} + \frac{0,15}{G} \right) = \frac{25 \cdot 10^6 \cdot 0,008^2}{0,022} \left(\frac{0,008^2}{32 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,022} + \frac{0,15}{8,1 \cdot 10^{11}} \right) = 1,34 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Kako je $f_{\max} \ll f_{dop}$ usvaja se $s_k = 22 \text{ mm}$.

6.4.3.3. Toplinska prohodnost

Toplinska prijelaznost medija za temperiranje α_K :

- faktor simetričnosti izmjene topline $x_s = 2$

$$\alpha_M = \frac{1}{\frac{x_s}{\phi_M} A_{KT} \cdot (T_K - T_M) - \frac{s_K}{\lambda_K}} = \frac{1}{\frac{2}{897,5} \cdot 0,024 \cdot (308 - 290) - \frac{0,022}{52}} = 1853 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Određivanje brzine protoka medija za temperiranje v_K :

- broj dvostrukih promjena smjera tečenja $n_p = 2$
- korelacijski član $K_{id} = 0,9$

$$\text{Re} = \left(\frac{\alpha_M \cdot d_K}{0,021 \cdot \lambda_M \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot K_{id}} \right)^{\frac{1}{0,8+0,01n_p}} = \left(\frac{1853 \cdot 0,008}{0,021 \cdot 0,599 \cdot 7,02^{0,4} \cdot 0,9} \right)^{\frac{1}{0,8+0,01 \cdot 2}} = 2446$$

$$v_M = \text{Re} \cdot v_M / d_K = 2446 \cdot 1,006 \cdot 10^{-6} / 0,008 = 0,3 \text{ m/s}$$

6.4.3.4. Proračun pumpe

Za temperiranje kalupa izabrano je temperiralo tvrtke *Regloplas* iznake P140 karakteristika:

- maksimalna temperatura medija za temperiranje $140 \text{ }^\circ\text{C}$
- raspoloživa snaga pri zagrijavanju 9 kW
- raspoloživa snaga pri hlađenju 39 kW
- kapacitet pumpe temperirala $45 \text{ l/min} = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

Provjera raspoloživog kapaciteta pumpe q_{TI} :

$$q_{TI} = \frac{d_K^2 \cdot v_M \cdot \pi}{4} = \frac{0,008^2 \cdot 0,3 \cdot \pi}{4} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Temperaturni gradijent medija za temperiranje ΔT_M :

$$\Delta T_M = \frac{4 \cdot \phi_M}{d_K^2 \cdot c_M \cdot v_M \cdot \rho_M \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 897,5}{0,008^2 \cdot 4183 \cdot 0,3 \cdot 998,2 \cdot \pi} = 14,25 \text{ K}$$

Temperaturni gradijent ΔT_M mora biti manji od 5 K, a često mora biti manji i od 1 K. Rezultat pokazuje da je temperaturni gradijent previsok. Kao korektivna mjera uzima se povećanje brzine protoka medija za temperiranje

Odabrana brzina protoka medija za temperiranje iznosi:

$$v_M = 2 \text{ m/s}$$

Potrebnii kapacitet pumpe tada iznosi:

$$q_{TI} = \frac{d_K^2 \cdot v_M \cdot \pi}{4} = \frac{0,008^2 \cdot 2 \cdot \pi}{4} = 10 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Iskoristivost brzine (kapaciteta) pumpe η_V :

$$\eta_V = \frac{q_{TI}}{q_{TP}} = \frac{10 \cdot 10^{-5}}{0,75 \cdot 10^{-3}} = 0,13 = 13\%$$

Temperaturni gradijent medija za temperiranje ΔT_M

$$\Delta T_M = \frac{4 \cdot \phi_M}{d_K^2 \cdot c_M \cdot v_M \cdot \rho_M \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 897,5}{0,008^2 \cdot 4183 \cdot 2 \cdot 998,2 \cdot \pi} = 2,14 \text{ K}$$

Ulazna temperatura medija za temperiranje T_{MU} :

$$T_{MU} = T_M - \Delta T_M / 2 = 290 - 2,14 / 2 = 288,93 \text{ K}$$

Izlazna temperatura medija za temperiranje T_{MI} :

$$T_{MI} = T_M + \Delta T_M / 2 = 290 + 2,14 / 2 = 291,07 \text{ K}$$

Određivanje brzine protoka medija za temperiranje v_K :

$$Re = \frac{v_M \cdot d_K}{\nu_M} = \frac{2 \cdot 0,008}{1,006 \cdot 10^{-6}} = 15904,5$$

Pad tlaka u kanalima za temperiranje Δp_{Ka} : (za $2\,300 < Re < 100\,000$ vrijedi jednačba)

$$\xi = 0,3164 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{Re}} = 0,3164 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{15904,5}} = 0,028$$

$$\Delta p_{Ka} = \frac{v_M^2}{2} \rho_M \left(\xi \frac{l_K}{d_K} + 1,5 m_p \right) = \frac{2^2}{2} \cdot 998,2 \cdot \left(0,028 \frac{0,240}{0,008} + 1,5 \cdot 4 \right) = 13655 \text{ Pa}$$

Pad tlaka u uređaju za temperiranje Δp_{Te} :

$$\Delta p_{Te} = 50000 \text{ N/m}^2$$

Pad tlaka u sustavu za temperiranje Δp_{ST} :

$$\Delta p_{ST} = \Delta p_{Ka} + \Delta p_{Te} = 13655 + 50000 = 63655 \text{ Pa}$$

Efektivno potrebna snaga pumpe N_{Pe}

$$N_{Pe} = \frac{v_M \cdot d_K^2 \cdot \Delta p_{ST} \cdot \pi}{4 \cdot \eta_p} = \frac{2 \cdot 0,008^2 \cdot 63655 \cdot \pi}{4 \cdot 0,9} = 7,11 \text{ W}$$

6.5. Mehanički proračun kalupa

6.5.1. Proračun kinematike kalupa

Visina otvaranja kalupa h_{OK} :

- | | |
|-----------------------------------|----------------------|
| - visina otpreska | $h_o = 9 \text{ mm}$ |
| - visina grozda | $h_g = 9 \text{ mm}$ |
| - visina uljevka | $h_u = 0 \text{ mm}$ |
| - dodatna visina otvaranja kalupa | $h_d = 6 \text{ mm}$ |

$$h_{OK} = h_o + h_g + h_u + h_d = 9 + 9 + 0 + 6 = 24 \text{ mm}$$

Minimalni potrebni razmak steznih ploča ubrizgavalice h_{umin} :

- | | |
|--------------------------------------|------------------------|
| - visina kalupa (iz projektne skice) | $H_K = 238 \text{ mm}$ |
|--------------------------------------|------------------------|

$$h_{umin} = h_{OK} + H_K = 24 + 238 = 262 \text{ mm}$$

Potrebno gibanje izbacivala :

$$h_i = h_o + H_{di} = 9 + 1 = 10 \text{ mm}$$

Za izbacivanje otpreska iz kalupa koristiti će se stlačeni zrak. Zadatak mehaničkih izbacivala u tom slučaju je pomoć pri izbacivanju.

6.5.2. Dimenzioniranje elemenata kalupa

Dimenzioniranje izbacivala i sustava za vođenje i centriranje:

Za potrebe kalupa za injekcijsko prešanje koriste se štapičasta izbacivala. Svi se elementi odabiru kao standardni elementi prema katalogu tvrtke HASCO, te nije nužno provoditi njihovo dimenzioniranje.

Dimenzioniranje sustava za odzračivanje kalupa:

U fazi razrade koncepcije kalupa, načelno je određen sustav za njihovo odzračivanje. Odzračivanje se provodi kroz otvore za izbacivala, te sustav nije potrebno posebno dimenzionirati.

Proračun sile vađenja otpreska iz kalupa i elemenata sustava za vođenje F_v :

- faktor trenja između plastomernog materijala i elemenata kalupne šupljine
 $\mu = 0,2$
- tlak u kalupnoj šupljini
 $p_K = 25 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
- površina elemenata kalupne šupljine u dodiru s otpreskom
 $A_0 = 0,037800 \text{ m}^2$

$$F_v = \mu \cdot p_K \cdot A_0 = 0,2 \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 0,0378 = 189000 \text{ N} = 189 \text{ kN}$$

Iznos sile vađenja otpreska je manji od iznosa sile vađenja otpreska odabrane ubrizgavalice što potvrđuje izbor ubrizgavalice.

Proračun krutosti kalupa okomito na smjer otvaranja:

- naprezanje stijenki kalupne šupljine
 $\sigma = p_K = 25 \text{ N/mm}^2$
- deformacija stijenke kalupne šupljine
 ε
 $\varepsilon_{ki} = \sigma / E_s = 25 / 21000 = 0,0011\%$
- skupljanje polipropilena
 $s_L = 1\%$

Time je zadovoljen uvjet da je maksimalno skupljanje otpreska tijekom preradbe veći od dopuštene deformacije stijenke kalupne šupljine.

- faktor sigurnosti
 $k = 1,2$
- sila na temeljnu ploču F

$$F_d = p_K \cdot A_0 \cdot k = 25 \cdot 10^6 \cdot 0,0378 \cdot 1,2 = 1134 \text{ kN}$$

- duljina temeljne ploče
 $h_{TP} = 346 \text{ mm}$
- progib temeljne ploče
 $f = 0,05 \text{ mm}$
- razmak između odstoynih letvi
 $b = 76 \text{ mm}$
- visina temeljne ploče h_{TP} :

$$h_{TP} = \left(\frac{5}{32} \cdot \frac{F_d \cdot b^3}{l_{TP} \cdot f \cdot E_s} \right)^{1/3} = \left(\frac{5}{32} \cdot \frac{1,134 \cdot 10^6 \cdot 76^3}{346 \cdot 0,05 \cdot 210000} \right)^{1/3} = 27,76 \text{ mm}$$

Proračun krutosti kalupa u smjeru otvaranja:

Određivanje dopuštenog „disanja“ kalupa:

Pokusi su pokazali da je pri injekcijskom prešanju plastomera poželjno „disanje“ kalupa od 0,1...0,2 mm. Da bi se smanjila opasnost od prelijevanja taljevine, odabire se vrijednost „disanja“ kalupa od 0,1 mm.

Sila ubrizgavanja F_U :

- faktor tečenja $K_f = 1,7 \cdot 10^5 \text{ Pa/mm}$
- faktor debljine stijenke $K_s = 2,1$
- maksimalni put tečenja $f_w = 128 \text{ mm}$
- pritisak ubrizgavanja

$$p_U = K_f \cdot K_s \cdot f_w = 1,7 \cdot 10^5 \cdot 2,1 \cdot 128 = 4,57 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

- promjer pužnog vijka $d_{pv} = 22 \text{ mm}$
- površina ubrizgavala

$$S_U = d_{pv}^2 \cdot \pi / 4 = 22^2 \cdot \pi / 4 = 380 \text{ mm}^2$$

$$F_U = p_U \cdot S_U = 4,57 \cdot 10^7 \cdot 380 \cdot 10^{-6} = 17366 \text{ N} = 17,366 \text{ kN}$$

Maksimalan broj okretaja puža n :

- maksimalna obodna brzina puža $v = 0,8 \text{ m/s}$

$$n = \frac{v}{\pi \cdot d_{pv}} = \frac{0,8}{\pi \cdot 22 \cdot 10^{-3}} = 11,57 \text{ s}^{-1}$$

6.6. Proračun nepotpune cijene koštanja otpreska

6.6.1. Osnovni podaci

Polimerni materijal otpreska PP Borpact™ SG930MO, proizvođač *Borealis*.

- | | |
|--|--------------------------------|
| - specifična gustoća | $\rho_P = 0,9 \text{ g/cm}^3$ |
| - jedinična cijena osnovnog materijala | $C_{om} = 10,22 \text{ Kn/kg}$ |

Obujam proizvodnje:

- | | |
|----------------------------|------------------------------------|
| - ukupna količina otpreska | $n_{uk} = 1\,000\,000 \text{ kom}$ |
| - veličina serije | $n_{ser} = 100\,000 \text{ kom}$ |

Ubrizgavalica:

- | | |
|------------------------------------|----------------------------|
| - cijena radnog sata ubrizgavalice | $C_{ru} = 50 \text{ Kn/h}$ |
| - cijena radnog sata radnika | $C_{rs} = 20 \text{ Kn/h}$ |

Podaci o otpresku:

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| - masa otpreska | $m_O = 28,43 \text{ g}$ |
| - masa uljevnog sustava | $m_{us} = 0 \text{ g}$ |

Podaci o kalupu:

- | | |
|---|--------------|
| - broj kalupnih šupljina | $x_{kš} = 1$ |
| - podaci o dijelovima kalupa dani su u tablici 6.3. | |

Troškovi prototipne serije

- | | |
|---|--------------------------------|
| - planirani broj prototipnih serija | $n_{KS} = 3$ |
| - veličina prototipne serije | $n_{serKS} = 80 \text{ kom}$ |
| - broj radnika | $n_r = 1$ |
| - pripremno završno vrijeme | $t_{pz} = 3 \text{ h}$ |
| - organizacijski gubici prototipne serije | $G_{OR} = 1 \text{ h}$ |
| - predviđeni troškovi dorade | $C_{osKS} = 2\,000 \text{ Kn}$ |
| - pouzdanost postupka | $\mu_P = 90 \%$ |
| - troškovi održavanja kalupa za seriju | $T_{0ser} = 3\,000 \text{ Kn}$ |

Troškovi probne (nutle) serije

- | | |
|---|----------------------------------|
| - veličina probne serije | $n_{serPS} = 5\,000 \text{ kom}$ |
| - broj radnika | $n_r = 1$ |
| - predvidivi dio škarta | $S_u = 8 \%$ |
| - udio škarta za ponovnu preradbu | $S_{up} = 1 \%$ |
| - pouzdanost postupka | $\mu_P = 90 \%$ |
| - pripremno završno vrijeme | $t_{pz} = 2,5 \text{ h}$ |
| - organizacijski gubici prototipne serije | $G_{OR} = 1,5 \text{ h}$ |
| - režijski troškovi kontrole ulaza | $C_{kPS} = 0 \text{ Kn}$ |

Tablica 6.3: Standardni elementi kalupa tvrtke HASCO [15]

Redni broj	Naziv standardnog elementa	Standard	Količina	Jedinična cijena (€)	Konačna cijena (€)
1.	Prsten za centriranje	K100/125 x 8	1	22,86	22,86
2.	Stezna kalupna ploča	K10/296x346x27	2	168,43	336,86
3.	Kalupna ploča	K20 /296x346x36	2	232,32	464,64
4.	Temeljna ploča	K30 /296x346x36	1	176,88	176,88
5.	Odstojne letve	K40/296x346x76	2	79,2	158,4
6.	Ploča izbacivala	K60/296x346	1	183,22	183,22
7.	Potisna ploča	K70/296x346x22	1	94,83	94,83
8.	Prsten za centriranje	K500/125 x 8	1	20,88	20,88
9.	Vruća mlaznica	Z101G/32 x 61	1	662	662
10.	Vodeći izvlakač	Z00/36/24 x 55	4	15,48	61,92
11.	Vodeći izvlakač	Z012/18 x 140	2	22,75	45,5
12.	Vodeća puškica	Z10/36/24	4	12,26	49,04
13.	Centrirna puškica	Z20/30 x 120	4	11,33	45,32
14.	Vijak	Z31/12 x 140	4	2,95	11,8
15.	Vijak	Z31/12 x 30	4	0,46	1,84
16.	Vijak	Z31/8 x 12	4	0,22	0,88
17.	Vijak	Z31/8 x 20	2	0,18	0,36
18.	Vijak	Z31/8 x 25	4	0,19	0,76
19.	Vijak	Z33/4 x 8	4	0,21	0,84
20.	Izbacivalo	Z40/12 x 160	4	8,94	35,76
21.	Zračni ventil	Z491/8/6	2	51,3	102,6
22.	Pločica	Z55/18 x 3	4	1,46	5,84
23.	Podložna pločica	Z691/12 x 2,5	8	0,1	0,8
24.	Podložna pločica	Z691/8 x 2	4	0,06	0,24
25.	Priključak za temperiranje	Z81/5/5 x 0,5	2	1	2
26.	Priključak za temperiranje	Z81/5/8 x 0,75	4	1,25	5
27.	Čep	Z94/8 x 0,75	16	0,28	4,48
28.	Brtveni čep	Z942/8	6	1,69	10,14
29.	Brtva	Z98/10/2,4	4	0,74	2,96
30.	Brtva	Z98/7,5/1,5	2	0,67	1,34
31.	Potisna motka	E1050/6/10/18x180	1	10,7	10,7
32.	Vijak	E 1230/10 x 16	1	0,2	0,2
				Ukupna cijena:	2509,99 €
					18322,93 Kn

Troškovi proizvodnje

- broj radnika	$n_r = 1$
- predvidivi dio škarta	$S_u = 5 \%$
- udio škarta za ponovnu preradbu	$S_{up} = 1 \%$
- pouzdanost postupka	$\mu_p = 95 \%$
- pripremno završno vrijeme	$t_{pz} = 2 \text{ h}$
- organizacijski gubici prototipne serije	$G_{OR} = 1 \text{ h}$

6.6.2. Troškovi konstruiranja

Ukupni troškovi konstruiranja T_{KON} :

- broj radnih sati za pojedinu fazu konstruiranja	n_{rki}
- broj radnih sati tehnološke razrade	$= 20 \text{ h}$
- broj radnih sati konstruiranja kalupa	$= 15 \text{ h}$
- cijena radnog sata za pojedinu fazu konstruiranja	C_{rki}
- cijena radnog sata konstruiranja	$= 160 \text{ Kn}$
- cijena radnog sata tehnološke razrade	$= 160 \text{ Kn}$
- ostali troškovi konstruiranja	$T_{KONS} = 0 \text{ Kn}$

$$T_{KON} = \left(\sum n_{rki} \cdot C_{rki} \right) + T_{KONS} = (20 \cdot 160 + 15 \cdot 160) + 0 = 5600 \text{ Kn}$$

Troškovi konstruiranja po jednom otpresku T_{KONO} :

$$T_{KONO} = T_{KON} / n_{uk} = 5600 / 1000000 = 0,0056 \text{ Kn}$$

6.6.3. Troškovi izradbe kalupa

Ukupna cijena osnovnog materijala nestandardnih elemenata kalupa T_{om} :

$$T_{om} = 4000 \text{ Kn}$$

Ukupna cijena obrade kalupa T_{iz} :

- broj sati pojedine operacije obrade	n_{izi}
- troškove obrade čine:	
• bušenje koordinatno	$= 10 \text{ h}$
• glodanje	$= 45 \text{ h}$
• erodiranje	$= 15 \text{ h}$
• ručna obrada	$= 20 \text{ h}$
- prosječna cijena radnog sata obrade	$C_{izi} = 150 \text{ Kn}$

$$T_{iz} = \sum n_{izi} \cdot C_{izi} = (10 + 45 + 15 + 20) \cdot 150 = 13500 \text{ Kn}$$

Ukupna cijena standardnih elemenata kalupa T_{sd} :

- količina pojedinog standardnog elementa n_{sdi}
- cijena pojedinog standardnog elementa C_{sdi}

$$T_{sd} = \sum n_{sdi} \cdot C_{sdi} = 18325 \text{ Kn}$$

Ostali troškovi izradbe kalupa T_{KOS} :

$$T_{KOS} = 15000 \text{ Kn}$$

Ukupni troškovi izradbe kalupa T_K :

$$T_K = T_{om} + T_{iz} + T_{sd} + T_{KOS} = 4000 + 13500 + 15000 + 18325 = 50825 \text{ Kn}$$

6.6.4. Troškovi prototipne serije

Ukupni trošak materijala za jednu prototipnu seriju C_{mKS} :

$$C_{mKS} = C_{om} \cdot m_o \cdot n_{serKS} = 10,22 \cdot 0,02843 \cdot 80 = 23,24 \text{ Kn}$$

Ukupni trošak ubrizgavalice za jednu prototipnu seriju C_{sKS} :

$$C_{sO} = \left(\frac{t_c}{x_{ks} \cdot \mu_p} + \frac{t_{pz} + G_{or}}{n_{serKS}} \right) \cdot C_{ru} = \left(\frac{0,0035}{1 \cdot 0,9} + \frac{3+1}{80} \right) \cdot 50 = 2,70 \text{ Kn}$$

$$C_{sKS} = C_{sO} \cdot n_{serKS} = 2,70 \cdot 80 = 216$$

Ukupan trošak radne snage za jednu prototipnu seriju C_{rKS} :

Zbog male serije i kratkog vremena ciklusa injekcijskog prešanja moguće je trošak radne snage zanemariti.

Troškovi prototipne serije T_{KS} :

$$T_{KS} = n_{KS} \cdot (C_{mKS} + C_{sKS} + C_{rKS} + C_{osKS}) = 3 \cdot (23,24 + 216 + 0 + 2000) = 6717,72 \text{ Kn}$$

6.6.5. Troškovi održavanja za jedan otpresak

$$C_{0serO} = T_{0ser} / n_{ser} = 3000 / 100000 = 0,03 \text{ Kn}$$

6.6.6. Troškovi probne (nulte) serije

Cijena materijala za probnu seriju C_{mPS} :

- stvarni jedinični utrošak materijala A

- stvarni jedinični gubici materijala zbog škarta B
- jedinični gubici materijala zbog upuštanja u rad i izmjene boje C

$$C_m = \frac{C_{om} + U_b C_b + U_r C_r}{1 + U_b + U_r} = \frac{10,22 + 0 \cdot 0,05}{1 + 0,05} = 9,73 \text{ Kn}$$

$$A = (m_O - m_{us} \cdot S_{pp}) / n_g = (28,43 - 0) / 1 = 28,43 \text{ g}$$

$$B = m_O \cdot S_u (1 - S_{up}) = 28,43 \cdot 0,08 (1 - 0,01) = 2,25 \text{ g}$$

$$C_{mO} = C_m \cdot (A + B + C) = 9,73 \cdot (28,43 \cdot 10^{-3} + 2,25 \cdot 10^{-3}) = 0,298 \text{ Kn}$$

$$C_{mPS} = C_{mO} \cdot n_{serPS} = 0,298 \cdot 5000 = 1490 \text{ Kn}$$

Cijena ubrizgavalice za probnu seriju C_{sPS} :

$$C_{sO} = \left(\frac{t_c}{x_{ks} \cdot \mu_p} + \frac{t_{pz} + G_{or}}{n_{serKS}} \right) \cdot C_{ru} = \left(\frac{0,0035}{1 \cdot 0,9} + \frac{2,5 + 1,5}{5000} \right) \cdot 50 = 0,23 \text{ Kn}$$

$$C_{sPS} = C_{sO} \cdot n_{serPS} = 0,23 \cdot 5000 = 1150 \text{ Kn}$$

Cijena rada za probnu seriju C_{rPS} :

$$C_{rO} = \left(\frac{t_c}{x_{ks} \cdot \mu_p} \right) \cdot C_{rs} \cdot n_r = \left(\frac{0,0035}{1 \cdot 0,9} \right) \cdot 20 \cdot 1 = 0,08 \text{ Kn}$$

$$C_{rPS} = C_{rO} \cdot n_{serPS} = 0,08 \cdot 5000 = 400 \text{ Kn}$$

Proizvodna cijena jednog otpreska probne serije C_{0PS} :

$$C_{0PS} = C_{m0} + C_{s0} + C_{r0} = 0,298 + 0,23 + 0,08 = 0,608 \text{ Kn}$$

6.6.7. Troškovi proizvodnje

Cijena materijala za proizvodnu seriju C_{mPS} :

$$A = (m_O - m_{us} \cdot S_{pp}) / n_g = (28,43 - 0) / 1 = 28,43 \text{ g}$$

$$B = m_O \cdot S_u (1 - S_{up}) = 28,43 \cdot 0,05 (1 - 0,01) = 1,40 \text{ g}$$

$$C_{mO} = C_m \cdot (A + B + C) = 9,73 \cdot (28,43 \cdot 10^{-3} + 1,4 \cdot 10^{-3}) = 0,29 \text{ Kn}$$

$$C_{mPS} = C_{mO} \cdot n_{serPS} = 0,29 \cdot 100000 = 29000 \text{ Kn}$$

Cijena ubrizgavalice za proizvodnu seriju C_{sPS} :

$$C_{sO} = \left(\frac{t_c}{x_{ks} \cdot \mu_p} + \frac{t_{pz} + G_{or}}{n_{serKS}} \right) \cdot C_{ru} = \left(\frac{0,0035}{1 \cdot 0,95} + \frac{2+1}{100000} \right) \cdot 50 = 0,185 \text{ Kn}$$

$$C_{sPS} = C_{sO} \cdot n_{serPS} = 0,185 \cdot 100000 = 18550 \text{ Kn}$$

Cijena rada za proizvodnu seriju C_{rPS} :

$$C_{rO} = \left(\frac{t_c}{x_{ks} \cdot \mu_p} \right) \cdot C_{rs} \cdot n_r = \left(\frac{0,0035}{1 \cdot 0,95} \right) \cdot 20 \cdot 1 = 0,073 \text{ Kn}$$

$$C_{rPS} = C_{rO} \cdot n_{serPS} = 0,073 \cdot 100000 = 7368 \text{ Kn}$$

Proizvodna cijena jednog otpreska proizvodne serije C_{0PS} :

$$C_{0PS} = C_{m0} + C_{s0} + C_{r0} = 0,29 + 0,185 + 0,073 = 0,548 \text{ Kn}$$

6.6.8. Prosječna cijena otpreska probne (nulte) i proizvodne serije

$$C_{PRO} = \frac{\frac{n_{serPS} + n_{ser}}{\frac{n_{serPS}}{C_{0PS}} + \frac{n_{ser}}{C_{0PS}}} = \frac{5000 + 100000}{\frac{5000}{0,608} + \frac{100000}{0,548}} = 0,55 \text{ Kn}$$

6.6.9. Konačna, nepotpuna cijena koštanja po otpresku

$$C_O = \frac{T_{KON} + T_K + T_{KS}}{n_{uk}} + C_{0serO} + C_{PRO} = \frac{5600 + 50825 + 6717,72}{100000} + 0,03 + 0,55$$

$$C_O = 1,21 \text{ Kn}$$

7. ZAKLJUČAK

Zahtjevi koji se postavljaju na polimerne otpreske, na području injekcijskog prešanje, intenzivno se povećavaju. Napori da se za istu namjenu potroši manje materijala, a time i energije, razvijaju nove tehnologije i postupke – jedan od kojih je postupak tankostjenog injekcijskog prešanja.

Ovim radom opisane su posebnosti postupka injekcijskog prešanja tankostjenih otpresaka u usporedbi s klasičnim postupkom injekcijskog prešanja plastomera. Tankostjeno injekcijsko prešanje odlikuje se kombinacijom brzog hlađenja i visoke brzine taljevine, što bitno smanjuje vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja. Materijali za tankostjeno injekcijsko prešanje odlikuju se visokim vrijednostima žilavosti i čvrstoće, te dimenzijskom točnošću. U ovom slučaju, za konkretan primjer – poklopac kutije za sladoled, izabran je materijal koji, uz već navedena svojstva, zadovoljava i uvjete ambalaže za duboko zamrzavanje – žilavost na niskim temperaturama.

U radu je korišten metodički pristup konstruiranju kalupa, čiji dijagrami za načelno određivanje pojedinih sustava su dali smjernice u određivanju optimalne konstrukcije kalupa. Na osnovi idejnih rješenja dobivenih načelnim dijagramima razvijana su optimalna rješenja pojedinih parcijalnih funkcija. Međutim, time još nije ostvareno optimalno rješenje ukupne funkcije, tj. optimalna konstrukcija kalupa. Da bi se ona ostvarila, potrebno je razviti odgovarajuće metode i kriterije optimiranja, kako bi se pomoću morfološke kutije odabrala optimalna rješenja pojedinih parcijalnih funkcija.

Softverskom simulacijom procesa punjenja kalupne šupljine s pomoću *Moldflow Mold Advisor* programskog paketa provedena je vrlo detaljna analiza procesa preradbe za zadani otpresak. Dobiveni rezultati korišteni su dalje u reološkom, toplinskom i mehaničkom dijelu proračuna, u kojem je izvršeno dimenzioniranje dijelova kalupa.

U okviru rada razvijen je kalup za zadani otpresak. Korišteni su standardni elementi kalupa tvrtke *HASCO*, te računalni programski paket *CATIA* za konstrukciju nestandardnih dijelova, poput žiga i matrice.

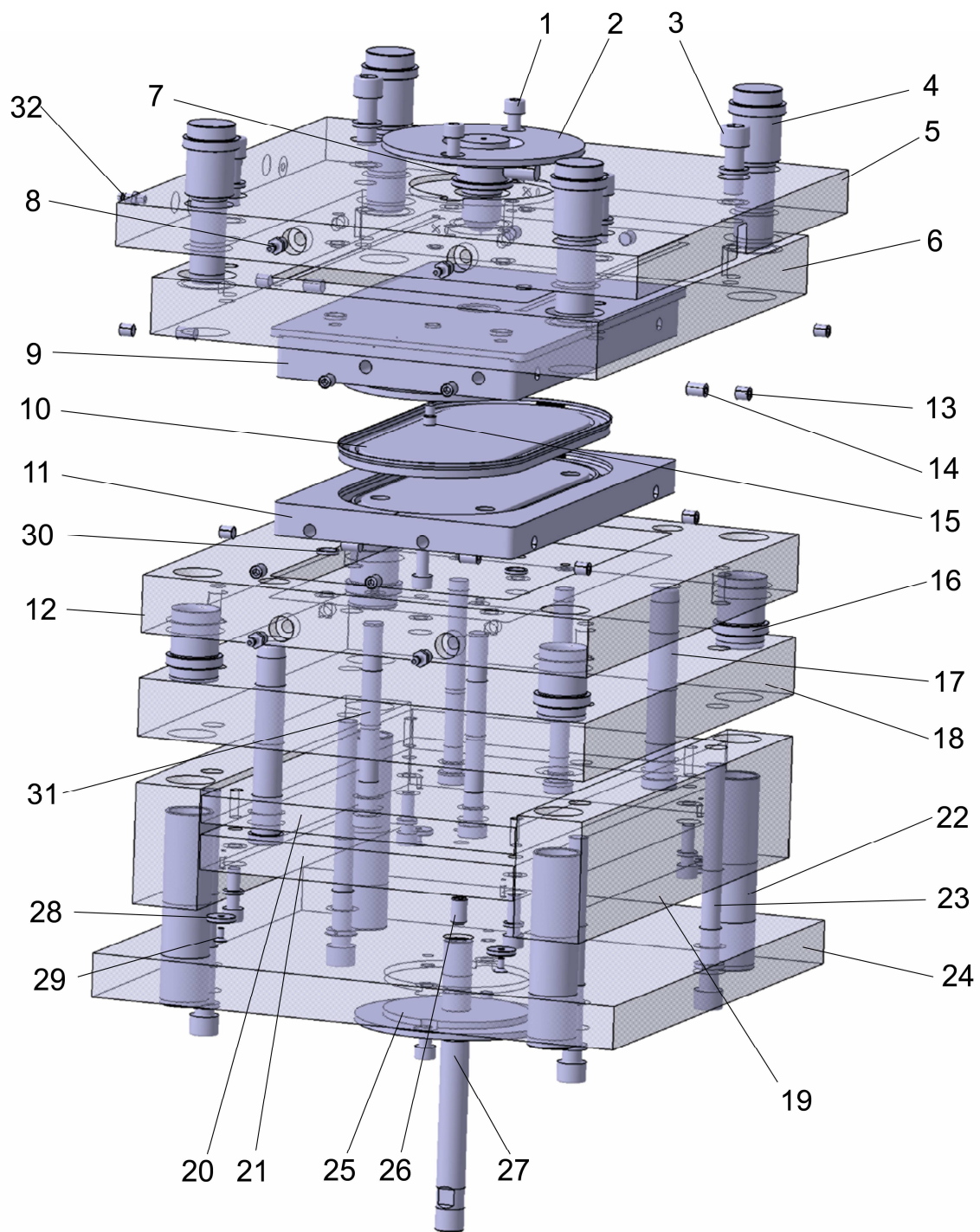
U konačnici, proračunom nepotpune cijene koštanja kalupa, određena je i nepotpuna cijena koštanja otpreska, koja pokazuje isplativosti proizvoda.

8. LITERATURA

1. I. Čatić: *Uvod u proizvodnju polimernih tvorevina*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1990.
2. A. Rogić, I. Čatić: *Injekcijsko prešanje polimera*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1996.
3. *Crown Contract Manufacturing*, <http://www.crown-cm.com/plastic-injection-molding.asp>, 25.10.2010.
4. D. Godec: *Magistarski rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2000.
5. *HBEC*, <http://www.hbec-thailand.com/index3.htm>, 25.10.2010.
6. *Custom Part*, <http://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding>, 25.10.2010.
7. I. Čatić, F. Johannaber: *Injekcijsko prešanje polimera i ostalih materijala*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 2004.
8. *Thin Wall Moulding*, http://www.mastip.com/ENG/Downloads/TA001_ThinWallMoulding_V1.00.pdf, 25.10.2010.
9. X. Guojung: *Study of thin-wall injection molding*, The Ohio State University, 2004.
10. D. Makanec: *Diplomski rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
11. I. Čatić, P. Raos, M. Šercer: *Parcijalne funkcije i morfološka matrica kalupa za injekcijsko prešanje polimera*, Polimeri 9, 1988.
12. P. Raos, I. Čatić: *Razvoj injekcijski prešanih polimernih tvorevina*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1992.
13. I. Čatić: *Izmjena topline u kalupima za injekcijsko prešanje plastomera*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1985.
14. *HASCO*, Katalog standardnih dijelova u digitalnom obliku
15. *Borealis Borpact™ SG930MO*, <http://www.borealisgroup.com/datasheets/10014872>, 25.10.2010.
16. *Sumitomo (SHI) Demag*, http://www.sumitomo-shi-demag.eu/fileadmin/user_upload/Downloads/Sumitomo/SE-DUZ%20specification.pdf, 25.10.2010.

9. PRILOG

1. Radionički crtež otpreska
2. Radionički crtež žiga
3. Radionički crtež matrice
4. Vizualizirani prikaz kalupa za injekcijsko prešanje zadanog otpreska



Pozicija	Naziv dijela	Dimenzije	Materijal
1	Vijak	Z31/8 x 12	8.8
2	Prsten za centriranje	K100/125 x 8	1.1730
3	Vijak	Z31/12 x 30	8.8
4	Vodeći izvlakač	Z00/36/24 x 55	1.0401
5	Stezna nepomična kalupna ploča	K10/296x346x27	1.1730
6	Kalupna nepomična ploča	K20 /296x346x36	1.1730
7	Vruća mlaznica	Z101G/32 x 61	FeCuNi
8	Priključak za temperiranje	Z81/5/8 x 0,75	2.0401
9	Matrica	270x160x30	X38CrMoV5-1
10	Otpresak	120x246x9	PP SG390MO
11	Žig	270x160x25	X38CrMoV5-1
12	Kalupna pomična ploča	K20 /296x346x36	1.1730
13	Čep	Z94/10 x 1	2.0401
14	Brtveni čep	Z942/8	2.0401
15	Zračni ventil	Z491/8/6	Ampcoloy 940
16	Vodeća puškica	Z10/36/24	1.0401
17	Vodeći izvlakač	Z012/18 x 140	1.1213
18	Temeljna ploča	K30 /296x346x36	1.1730
19	Odstojne letve	K40/296x346x76	1.1730
20	Ploča izbacivala	K60/296x346	1.1730
21	Potisna ploča	K70/296x346x22	1.1730
22	Centrirna puškica	Z20/30 x 120	1.0401
23	Vijak	Z31/12 x 140	8.8
24	Stezna pomična kalupna ploča	K10/296x346x27	1.1730
25	Prsten za centriranje	K500/125 x 8	1.1730
26	Vijak	E 1230/10 x 16	8.8
27	Potisna motka	E1050/6/10/18x180	1.7131
28	Podložna pločica	Z691/8 x 2	1.7221
29	Vijak	Z33/4 x 8	8.8
30	Brтва	Z98/10/2,4	Viton
31	Izbacivalo	Z40/12 x 160	1.2516
32	Priključak za temperiranje	Z81/5/5 x 0,5	2.0401